

Tesis:

# Las aplicaciones arquitectónicas de los materiales con cambio de fase en los cerramientos exteriores

Paolo Maselli

Tutores:

**Prof. Helena Coch, Prof. Antonio Isalgue, Prof. Cristina Pardal**

Departament de Construccions Arquitectòniques 1, - ETSAB, UPC, Diagonal 649, 08028 Barcelona, España.

## Índice:

### 1. Introducción

### 2. Antecedentes

Sistemas que dejen pasar la luz y almacenan calor  
Contexto de referencia

### 3. Estado del Arte

Problemas de los PCM  
Aplicaciones arquitectónicas  
PCM en sistemas de captación indirecta

### 4. Cerramientos exteriores con PCM: el caso del GlassX

Casa en Ebnat- Kappel  
Viviendas en Domat Ems  
Componentes  
Diferentes sistemas GlassX  
Costes  
PCM contenido en el GlassX  
Funcionamiento en verano  
Impacto ambiental del GlassX  
Medición de una aplicación

### 5. Comparación entre GlassX y Muro Trombe

Pabellón en Roma  
Clima  
El proyecto  
Sistemas captadores  
Material con cambio de fase  
Muro Trombe  
Comparación

### 6. Dos demostraciones con PCM

Primera demostración  
Segunda demostración

### 7. Conclusiones

### 8. Bibliografía

## 1. Introducción

Jano es una de las divinidades más antiguas e importantes de la religión romana. Los antiguos ponían el nombre del dios en relación con el movimiento, el pasaje, como portero del comienzo y del final. Su representación clásica, con dos cabezas, bicéfalo (fig.1), una para vigilar quien entra y otra para vigilar quien sale, puesta adelante de las puertas (ianuae en latín), de los pasajes (iani) y de los puentes.

Así me imagino los materiales con cambio de fase, un micro elemento con dos caras, que controlan el movimiento del calor. Con una cara vigila la temperatura, hasta que llegue a un límite. Entonces comienza un cambio, almacenado calor y alcanzando una nueva fase: es allí que enseña la otra cara.

Esos tipos de materiales se llaman PCM, acrónimo inglés de Phase Change Material, o sea material con cambio de fase, conocidos desde los años 50 y estudiados siempre con mayor intensidad para diferentes aplicaciones. Sus características son que para cambiar de fase, de líquido a sólido por ejemplo, necesitan una gran cantidad de calor. Sus aplicaciones son dirigidas sea para calentar que enfriar, abriendo una interesante perspectiva también en el sector de la edificación, para disminuir su gasto energético y relativo impacto ambiental, actualmente en constante aumento.

La rápida evolución del estilo de vida contemporáneo implica una continua innovación de los productos para satisfacer las necesidades en arquitectura, paralelamente a las del medio ambiente. Es el caso del GlassX, un tipo de cerramiento, que permite al mismo tiempo aislar térmicamente, dejar pasar la luz y almacenar calor, gracias a un tipo de PCM contenido en una de sus capas.

Este efecto es debido a unas sales hidratadas, que absorbiendo la radiación solar se funden y almacenan calor para luego devolverlo, cuando el PCM se enfría. El PCM es herméticamente sellado en un contenedor de policarbonato, pintado de gris para incrementar la eficiencia de absorción. Los contenedores están puestos entre dos lamas de vidrio y el cerramiento puede ser completado con otras dos capas de cristal, más un vidrio prismático, para reflejar los rayos con un alto ángulo de incidencia (en verano) y dejar pasar los invernales.

La tesina quiere evaluar las aplicaciones arquitectónicas de los materiales con cambio de fase en los cerramientos exteriores, analizando el caso innovador del GlassX y comparándolo con sistemas constructivos similares.



Fig. 1: Escultura Wandlung (transformación) de Christine Dewerny, representante Jano bicéfalo, 2007, Arenisca, 54x23x26cm



## 2. Antecedentes

Para controlar el confort térmico, acústico y lumínico del interior de un edificio en los climas fríos templados, los cerramientos tienen que satisfacer las características de aislamiento e inercia térmica, estanqueidad al agua, aberturas móviles para regular la ventilación y transparencia al paso de luz.

Estas características no han podido ser resumidas en un único sistema constructivo por los límites de los materiales usados. Las partes de la fachada han sido clasificadas por opacas y transparentes.

Hasta que en el siglo XIV empieza a difundirse el uso del vidrio en las ventanas, los cerramientos ofrecían solo una solución para el confort térmico y las reducidas aperturas eran mal cerradas con papel o tela [4]. En algún caso más lujoso, como en iglesias, el alabastro permitía una semitransparencia lumínica, pero el reducido espesor no le confería calidades térmicas (fig.2).

El vidrio era caro y disponible en principio en pequeñas piezas y solo desde el siglo XX empieza su difusión gracias a la técnica del flotado, con piezas de dimensiones hasta 6 metros de ancho. Es un elemento selectivo, que permite la entrada de luz sin dejar pasar el aire, con lo que detiene en gran parte la fuga de calor y elimina las corrientes de aire en el interior.

Con la introducción del doble vidriado hermético, compuesto por dos o más capas de cristal, separadas entre sí por una cámara de aire o gas que le confiere una capacidad de aislante térmico, se han conseguido valores de transmitancia parecidos al de una pared convencional ( $U = 0,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ).

Esos sistemas han conseguido mejorar las prestaciones lumínicas, aislar térmicamente y en el caso del doble vidriado también acústicamente. Pero esos sistemas, llamados “ligeros” tienen una escasa inercia térmica, esencial para reducir la variabilidad a lo largo del día o de la estación. También la temperatura radiante puede tener un efecto negativo si esos elementos no están cuidadosamente estudiados respecto al interior del ambiente.

El vidrio tiene larga difusión en la arquitectura moderna, superando el concepto de ‘abertura’ hasta llegando a sustituir la pared opaca y revestir totalmente la fachada con elementos continuos ligeros, eliminando la característica de inercia térmica de los muros macizos.



Fig. 2: La Seu Vella de Llerda: particular exterior (derecha) e interior (izquierda) de las ventanas cerradas con piezas de alabastro.



## Sistemas que dejan pasar la luz y almacenan calor

Unos de los resultados de la crisis del petróleo de los años 70, fue una importante investigación en arquitectura pasiva. Entre las ideas que se realizaron para bajar el consumo energético de los edificios, está el muro de agua y un pionero en su uso, fue Steve Baer en su residencia en Corrales, Nuevo México en el 1971(fig. 3).

Ese tipo de muro se utiliza como una de las estrategias de diseño para amortiguar la variación de la onda térmica interior respecto al exterior. Son sistemas simples que acumulen calor y luego lo ceden al interior, cuando en el exterior la temperatura baja. [3]

El sistema de Steve Baer, también llamado drumwall (muro de bidón), es una fachada expuesta a Sur compuesta por bidones de metal pintados de negro y rellenos de agua, colocados apilados sobre un entramado metálico y perpendiculares a la fachada vidriada. Externamente hay un panel giratorio que funciona de aislante térmico con la cara interior en metal reflejante. Durante el día invernal, el panel está tumbado en el suelo y los bidones captan la radiación solar, sea directamente la reflejada por el panel o la directa. Además, los bidones, gracias a su colocación dejan pasar una luz difusa hacia el interior de la casa. Por la noche, el panel se cierra y el calor almacenado durante el día es devuelto a la casa [27]. En verano esos sistemas pueden funcionar al revés para refrescar, dejándolos enfriar por la noche exponiéndolos hacia el exterior e intercambiando calor con el interior durante el día.

Este sistema no encontrará mucha difusión en el futuro, por sus limitaciones que tiene en temas como peso (se necesita menos peso que el hormigón pero no ofrece soporte estructural) y poca capacidad de armonizarlo con el interior. Otros ejemplos han sido desarrollados recientemente, como en la competición Solar Decathlon del 2009 presentada por la Universidad de Arizona (fig. 4).



Fig. 3: La casa de Steve Baer en Corrales, Nuevo México del 1971. La fachada sur desde el exterior (derecha) e interior



Fig. 4: La casa pasiva de la Universidad de la Arizona, Solar Decathlon del 2009. La fachada sur desde el exterior (derecha) e interior

Contemporáneamente se está investigando sobre mezclas de hormigón y fibras ópticas, que permiten transmitir la luz hacia el interior y el exterior, uniendo diferentes requisitos de confort térmico y acústico propios del hormigón y lumínico de la fibra óptica.

Es el caso del LiTraCon® (Light Transmitting Concrete) desarrollado por el arquitecto húngaro Aaron Losonczi en el 2001. Es una mezcla de hormigón y fibras ópticas, prefabricado en bloques. Las pequeñas fibras se colocan en el molde y luego son adheridas con el cemento, acabando como si fuera un agregado que le da más homogeneidad. Está hecho a mano, y por esto cada pieza tiene una textura diferente. Lo producen con diferentes espesores, desde 2,5 hasta 50 cm (fig. 5) [23, 28].

La empresa Italcementi está investigando por el mismo camino, comercializando el iLight, hormigón con añadidos en resina, que permiten una transparencia hasta el 19% de la superficie total (fig. 6) [29].

## Contexto de referencia

La investigación de esta tesina quiere profundizar también en el contexto de referencia, que enfocado en los climas fríos/templados, con particular atención para el mediterráneo, para una visión más práctica. O sea, donde se necesita la inercia térmica para suavizar la variabilidad de temperatura exterior, en el interior del edificio.



Fig. 5: Imágenes del LiTraCon en una pared interior y exterior.



Fig. 6: Imágenes del iLight aplicado en el pabellón italiano de la Expo de Shanghai del 2010



### 3. Estado del Arte

Uno de los problemas a los que se enfrenta la sociedad contemporánea, es la crisis energética y la contaminación ambiental. El precio de la energía está en constante aumento, sobretodo por estar relacionado con el uso de combustibles fósiles y otros elementos no renovables.

Mientras por un lado se está investigando sobre fuentes de energía renovable, actualmente se trabaja para reducir la demanda energética. Un sistema para conseguir eso, es el acondicionamiento pasivo con almacenamiento de energía térmica.

Además de los sistemas tradicionales de arquitectura pasiva en los últimos años, se nota un aumento exponencial sobre el tema de los materiales con cambio de fase (8799 publicaciones desde el 1972 en la base de datos Compendex, entre la cuales 1385 solo en el 2010, fig. 7), aunque podemos encontrar artículos que desde los años 30 tratan de los PCM.

El almacenamiento energético, por calor latente, es el sistema utilizado por los PCM. Actualmente se investiga también sobre el sistema por calor sensible (agua, rocas,...) es decir, por aumento o descenso de la temperatura del materia acumulador y por reacción termoquímica, aprovechando el calor puesto en juego en la reacción.

El calor latente es la cantidad de energía que se guarda en un material cuando cambia su estructura molecular, su fase o su estado de hidratación. El cambio de fase podría ser entre la fase sólida y líquida o entre la líquida y gaseosa. Pero también podría ser un cambio en la estructura sólida como pasar de la estructura cristalina a la amorfa o entre la distinta cantidad de agua absorbida en un material. La transición líquida-gaseosa no se usa normalmente para almacenamiento térmico latente, porque el volumen del material aumenta mucho más al pasar del líquido a gas.

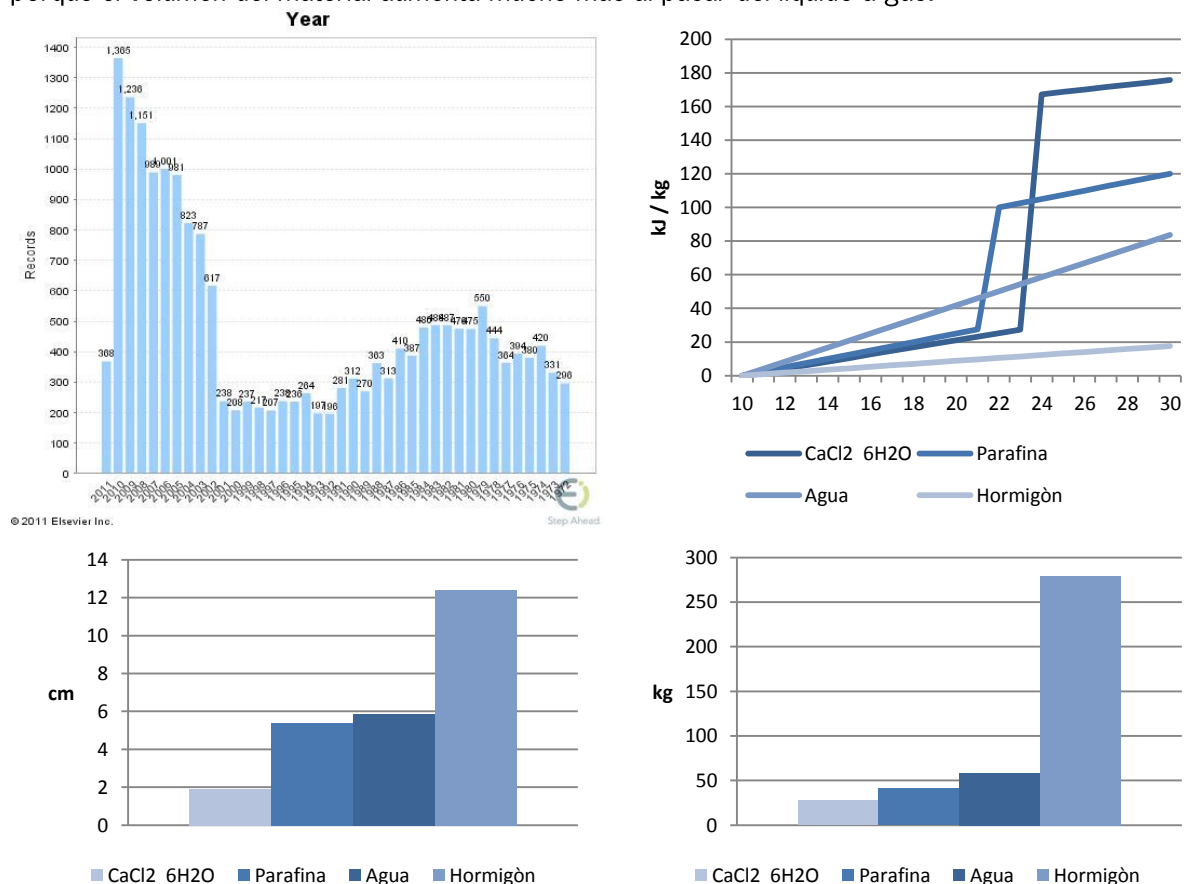


Fig. 7: Publicaciones 1972-2010 sobre los PCM en la base de datos Compendex

Fig. 8-10: Gráficos de comparación entre dos PCM, agua y hormigón: calor almacenado respecto a la temperatura, espesor y peso.



El PCM es una sustancia con una alta entalpía de fusión, que fundiendo y solidificando con una determinada temperatura, es capaz de almacenar y devolver una gran cantidad de energía (fig. 8-10). El calor es absorbido o devuelto cuando el material cambia de fase y viceversa; por eso los PCM son clasificados como unidad de almacenamiento de calor latente (LHS: Latent Heat Storage). [27]

Las características que deben tener los PCM para su correcto uso son:

- temperatura de fusión en un rango en cual se quiere utilizar
- fundirse con un enfriamiento mínimo
- ser químicamente estable
- bajo en coste
- no toxico y no corrosivo

Para responder a esas prestaciones, los PCM que han sido estudiados en los últimos 40 años son:

- sales hidratadas (inorgánicos)
- ceras de parafina (orgánicos)
- ácidos grasos (orgánicos)
- mezclas eutécticas orgánicos e inorgánicos

Han sido catalogados por su temperatura de fusión:

- < 15 °C: usados para almacenar frio (por ejemplo para el aire acondicionado)
- > 90 °C: usados para absorber la refrigeración
- > 15 °C < 90 °C: más estudiados porque tienen altos niveles de carga térmica, utilizables como para el calentamiento solar (fig. 11) [11]

Las sales hidratadas son un material atractivo por su alta densidad volumétrica de almacenamiento (350 MJ/m<sup>3</sup>), baja transmitancia térmica relativa (0,5 W/m<sup>2</sup> K) y con costes moderados.

En el siguiente grafico se comparan los diferentes métodos de almacenamiento de calor. [12]

Propiedad	Roca	Agua	PCM Orgánico	PCM Inorgánico
densidad, kg / m <sup>3</sup>	2240	1000	800	1600
Calor Especifico kJ / kg	1,0	4,2	2,0	2,0
Calor latente, kJ / kg			190	230
Calor latente, kJ / m <sup>3</sup>			152	368
Masa para almacenar 10 <sup>6</sup> J, kg	67 000	16 000	5 300	4 350
Volumen para almacenar 10 <sup>6</sup> J, m <sup>3</sup>	30,0	16,0	6,6	2,7
Masa relativa de almacenamiento	15,0	4,0	1,2	1,0
Volumen relativo de almacenamiento	11,0	6,0	2,5	1,0

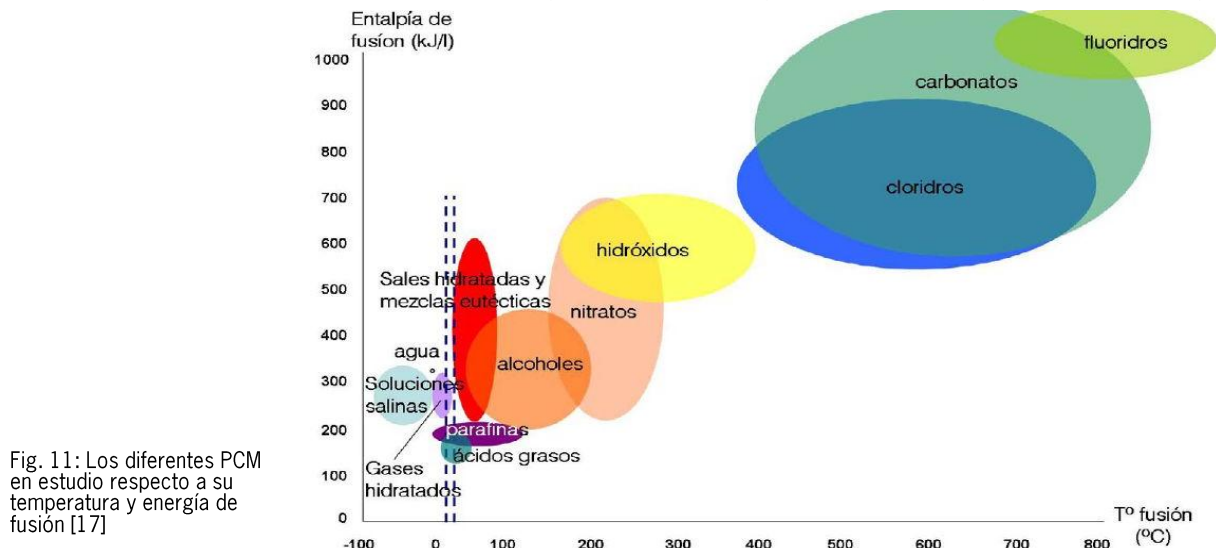


Fig. 11: Los diferentes PCM en estudio respecto a su temperatura y energía de fusión [17]

## Problemas de los PCM

La investigación actual está trabajando para resolver diferentes problemas de esos materiales.

### Contenedores

La mayoría de los problemas siguientes están relacionados con el tema de los contenedores. Los PCM son materiales utilizados por su estructura molecular variable, así que cambiando de estado tienen que estar contenido para no dispersarlo.

Así que el material del contenedor tiene que ser afine al PCM, desde un punto de vista térmico (dilatación térmica y conductividad), mecánico (sin dispersión) y químico (vida útil). Otras características pueden mejorar sus prestaciones como para la inflamabilidad.

La inmersión es una técnica utilizada para contenerlos. Se sumerge el material poroso dentro de un PCM derretido, rellenando los poros por capilaridad.

Otra técnica es de encapsularlos, normalmente dentro materiales polímeros o metálicos.

Un técnica recién es la del microencapsulado, o sea de poner el PCM en pequeñas bolitas para que luego se puedan mezclar con otros materiales sin que esté en contacto con el, creando un nuevo elemento con mayor almacenamiento térmico.

### Vida Útil

Problema importante de los PCM es su vida útil y de su envoltente sin que pierdan sus propiedades, problema que hasta ahora ha limitado su empleo a gran escala. Eso es debido por la pobre estabilidad de las propiedades de los materiales, sometidos a un continuo ciclo de calentamiento y enfriamiento y la corrosión tras el PCM y el contenedor [20].

Tyagi e Buddhi [19] testaron una sal hidratada ( $\text{CaCl}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ ), averiguando que este sal después de 1000 derribos sigue manteniendo su propiedades, confirmando su posible uso por tiempo largos, importante en la construcción.

### Baja conductividad

Otro problema a resolver, es la baja conductividad del PCM, que no le permite de ser un buen intercambiador. Se están haciendo pruebas con insertos de agua y de metales, o utilizar directamente contenedores metálicos. [12]

### Dilatación Térmica

Para cambiar fase, esos materiales varían su volumen hasta un 10 %.

### Inflamabilidad

La inflamabilidad del PCM orgánico, el más adaptado para la edificación para la relación entre temperatura de fusión y capacidad térmica, es otro detalles que se quieren resolver próximamente, aunque sus aplicaciones pueden ser muchas y tienen que aun ser descubiertas.



Fig. 12: Diferentes contenedores de PCM: capsulas metálicas, de poliolefina y micro capsulas [17]

## Aplicaciones arquitectónicas

La pionera que usó con un fin práctico los PCM en la construcción fue la doctora Maria Telkes, cuando al final de los años 1940 construyó una casa con una superficie en planta de 145 m<sup>2</sup>. El calor se almacenaba en cinco bidones llenos de sal de Glauber. Desde entonces han sido desarrollados diferentes experimentos y prototipos que ha llevado a los actuales elementos en comercio.

Descartando para en este informe los PCM utilizados en sistemas de condicionamiento sea para refrigerar que calentar, la aplicación actual como sistema pasivo de los PCM en los edificios puede ser clasificada en dos tipos: almacenamiento térmico pasivo y sistema de captación indirecta.

El primer tipo es un sistema de almacenamiento térmico por transmisión indirecta y nacen con la función de aumentar la inercia térmica en los edificios 'ligeros'. Actúan como estabilizador de la temperatura interior, almacenando el calor en exceso, devolviéndolo cuando la temperatura baja. Se eligen según la temperatura de fusión del PCM (normalmente la de confort) y se pueden utilizar sea en verano como en invierno. Es la más difundida en el mercado con diferentes tipos y aplicaciones. No necesitan manutención y la durabilidad depende del número de derribos, que en algunos estudios demuestran que pueden alcanzar unas decenas de años. Es gracias al espesor y peso reducido, son fáciles de integrar en las construcciones nuevas y existentes y se pueden aplicar en las diferentes partes del edificio como en muros exteriores, particiones interiores (tabiques, falso techos, etc.) y en instalaciones. [18]

La empresa Sueca Climator, que desde el 1980 investiga en el campo de los PCM ha realizado elementos para falso techos. El PCM, contenido en bolsas de aluminio, es un sulfato de sodio con agua y aditivos, que tiene una temperatura de fusión de 24 °C, una capacidad de almacenamiento entre 15 y 34 °C de 210 kJ/kg, calor latente de fusión de 140 kJ/kg. El PCM puede ser aplicado directamente o se puede incrementar el sistema poniendo las bolsas en una placa metálica ventilada. Un ejemplo aplicado es en la biblioteca de Skövde en Suecia (fig. 13-15) [30]

Un efecto parecido es dado por la placa Energain producido por DuPont. Dos capas de aluminio de 0,13 mm con dentro 5 mm de una mezcla de etileno con base polímero (ethylene based polymer) (40%) y una cera de parafina microencapsulada (60%). Las placas tienen un tamaño de 100 por 120 cm, y pueden ser cortadas a medida y selladas con un celo de aluminio para colocarlas en tabiques y falso techos. El punto de fusión es de 21,7 °C y la capacidad de almacenamiento es de 70 kJ/kg (fig. 16) [32]. El contenedor resuelve diferentes problemas analizados antes: la conductividad, la inflamabilidad, y una rigidez que ofrece una fácil puesta en obra. Personalmente he desarrollado una demostración con unas muestras de este elemento, expuestas en el capítulo 6.

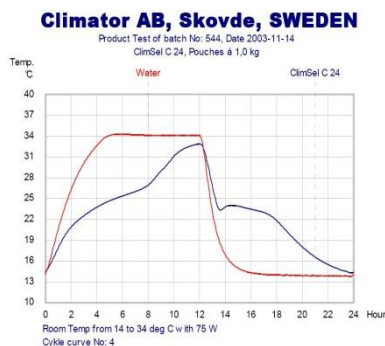


Fig. 13-15 (arriba): Climator: test entre el PCM y otra con agua de una habitación con temperaturas que varían entre 14 y 34 °C; dos foto de una aplicación en un techo.

Fig. 16 (derecha): Energain: foto de una aplicación en paredes interiores y techos.





Un sistema constructivo de fachada que utiliza PCM ha sido desarrollado por Schüco con el producto 2° System [25, 37].

Es un sistema compuesto por una parte fija y otra móvil de diferentes capas con la finalidad de reducir los gastos energéticos del edificio. La parte móvil tiene, partiendo desde el exterior, un panel fotovoltaico, un elemento de protección solar, un elemento de aislamiento térmico y otra de triple vidrios (fig.17).

La parte fija tiene un muro 'térmicamente activo' que puede funcionar en dos maneras: refrigeración híbrida con recuperación del calor y enfriamiento nocturno, con integración de equipo de ventilación por un recupero de calor del 85 %, o con enfriamiento pasivo con los PCM (fig.18).

La PCM son unos paneles de nido de abeja: de día el PCM absorbe calor desde el aire caliente que descargará durante la noche, y con una interacción entre el aire ventilado y el PCM se pueden incrementar sus capacidades, bajando los picos de temperatura y la necesidad de aportes de aire acondicionado.

Su aplicación no es directa en la pared si no están protegidas por envoltorios y pueden ser reutilizados. Los productores, sin especificar el tipo de PCM utilizado, hablan de una durada funcional genérica de unos 30 años, y que pueden ser reciclados por qué no se consuman.

Otros investigadores han desarrollado la aplicación arquitectónica de los PCM contenidos en placas por inmersión. Resultados ya en mercado son comercializados por la empresa química BASF con el material Micronal [31]. Son dos tipos de PCM, en polvo o líquido, que vienen mezclados con placas de yeso de unos 15 mm hasta bloques de hormigón. De esa forma pueden ser utilizados en diferentes partes del edificio y también con diferentes rangos de temperatura de fusión de los diferentes PCM (fig. 18-20).



Fig. 17: El 2° System. En primer plano las placas de PCM | Fig. 18: Esquema de funcionamiento del sistema: 1 Ventilador; 2 Recuperación 3 PCM

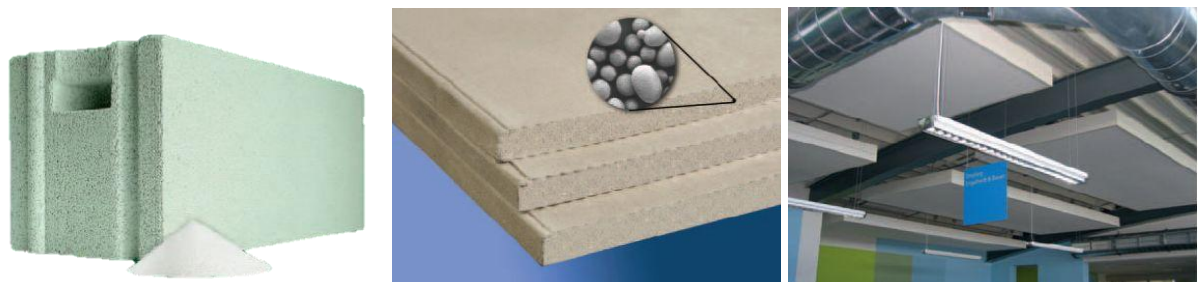


Fig. 18-20: Micronal: las placas, los bloques y una aplicación en un techo

## PCM en sistemas de captación indirecta

El segundo tipo desarrollado con PCM en la construcción es un sistema de captación indirecta: por una cantidad de calor almacenado, necesita meno espacio y meno peso que un muro solar tradicional.

Actualmente hay pocos elementos en mercados con estas características, pero se están conduciendo estudios en este campo. Castellón et. al. [6, 7, 8] han desarrollado unos experimentos con unos bloques de hormigón mixtos con un PCM microencapsulado, con un punto de fusión de 26°C y una entalpia de 110 kJ/kg. Tiene menor resistencia mecánica le los hormigones tradicionales. Diferentes análisis sin y con efecto invernadero enseñan un interesante desarrollo futuro de esta aplicación.

A parte de esa evolución, los PCM ofrecen una verdadera novedad para la construcción. Siendo algunos de ellos traslucidos, nos presenta por la primera vez la capacidad de un material de almacenar calor al mismo tiempo de transmitir la luz. Necesitando poco espesor y gracias a la conformación molecular de algunas sales y parafinas que nos ofrece estas propiedades, tendremos nuevas aplicaciones en arquitectura, sea para interior que exterior, para particiones fijas o muebles.

Así que aplicaciones de este tipo la podemos encontrar en otros objetos como por ejemplos cortinas interiores, compuestas por bolsas plásticas contenientes PCM. Durante el día son expuestas a la radiación solar, absorbiendo calor mientras se funde el PCM. De noche aislamos la ventana y el PCM radia el calor almacenado hacia la habitación (fig. 21) [16]

También interesantes son las aplicaciones de estas características en paredes exteriores. Dominguez et. al. [9,10] realizan experimentos y patentan un tipo de pared acumulador transparente, compuestas por bloques de vidrio con dentro PCM (fig. 22-23)

Otros estudios han sido realizados por Manz [15] eligiendo un PCM con una elevada cantidad de agua para permitir una elevada capacidad térmica y transmisión de luz. Completando el diseño de la fachada con un aislante térmico transparente alveolar (TIM) puesto entre dos capas de vidrio (fig.24-27).

Dese estos análisis se desarrolla el sistema constructivo GlassX, que tiene las características de poder transmitir luz a la vez de almacenar calor y aislar térmicamente y acústicamente. Actualmente no tiene igual en mercado, por esto esta tesina quiere evaluar sus características y compararlo en los capítulos siguientes.

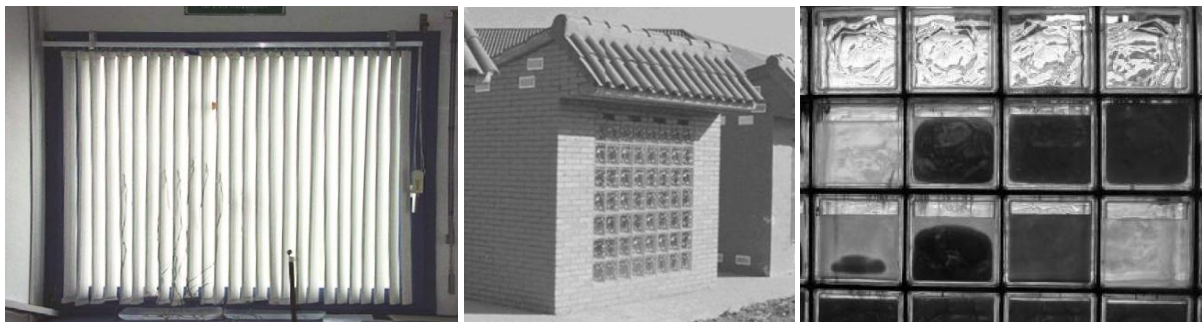


Fig. 21: Cortina de listones en plástico con dentro PCM | Fig. 22-23 Caseta experimental y los PCM en la fachada con diferentes fases

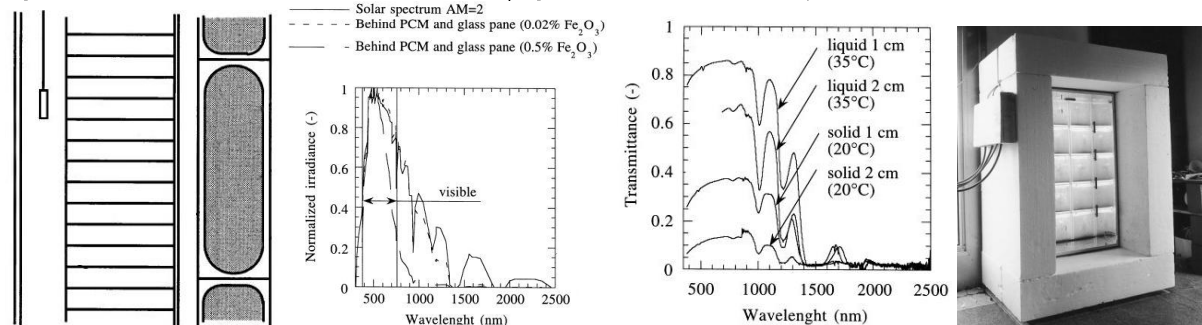


Fig. 24-27: Sección del muro de Manz (desde izquierda: PCM en contenedores de vidrio, cámara de aire, luna de vidrio, TIM – Material Aislante Transparente, cortina, luna de vidrio) la distribución espectral, la transmitancia del PCM y la foto de la caja experimental

## 4. Cerramientos exteriores con PCM: el caso del GlassX

En el mercado de la construcción actual, son pocos los productos que han integrado los PCM en los sistemas constructivos de fachada. La recién investigación en este campo y los límites que tienen estos materiales a lado de sus calidades, son unas de las razones de su poca difusión. Entre esos, el caso del GlassX merece una particular atención por sus características innovadoras.

### La casa en Ebnat- Kappel

Un pionero en utilizar los PCM en los cerramientos exteriores fue el arquitecto suizo y profesor en la ETH, Dietrich Schwarz. En el 2000 desarrollo el proyecto piloto a cero energía para la SuisseEnergie (Premio Solar Suiza 2001) de una casa unifamiliar en Ebnat-Kappel, un pequeño pueblo en la suiza oriental. La casa, 109 m<sup>2</sup> para 2 + 2 personas, fue realizada en 4 meses, entre verano y otoño del 2000, con paneles de madera prefabricados y con coste de construcción de 410.000 €, 3700€/m<sup>2</sup>, incluyendo el garaje, la bodega y el taller [33, 34].

En la fachada sur, que gracias a la pendiente de la cubierta hacia norte tiene una mayor superficie de captación solar, se alternan sistemas directos, altos ventanales, con otros indirectos translucidos para el almacenamiento de calor. Es un prototipo de fachada de PCM realizada con elementos de plástico rellenos de parafina. Todas las habitaciones tienen una pared de este tipo, que sirve como elemento de calefacción. La construcción de la fachada abarca tres componentes de sistema: protección contra la radiación en verano, aislamiento térmico translucido (TWD) y acumulador térmico.

La radiación solar invernal, de bajo ángulo de incidencia, entra sin obstáculos hacia las placas de PCM y funde la parafina que mantiene la temperatura de su punto de fusión hasta las primeras horas de la noche, cuando cede calor al espacio interior, antes de volver a su estado sólido con el frío.

En verano, la fachada permanece térmicamente neutra, ya que una capa antepuesta de vidrio prismático refleja los rayos solares, de gran ángulo de incidencia. [14]

El coste de la pared con PCM ha sido de 815 €/m<sup>2</sup>, teniendo en cuenta que es un prototipo.

Demanda térmica: 500-700 kWh/año (4,6-6,4 kWh/año y m<sup>2</sup>).



Fig. 28: Vista general de la Casa Ebnat- Kappel, con en primer plano la fachada Sur



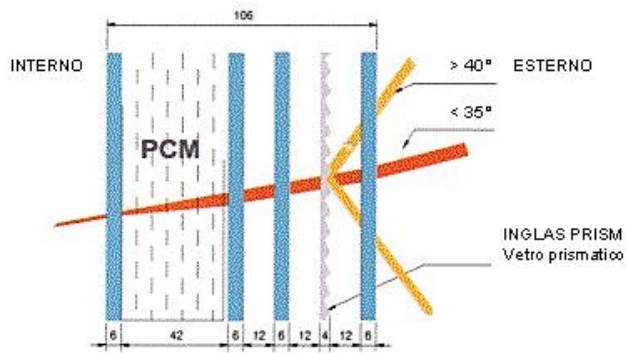


Fig. 29: Esquema de la pared con PCM

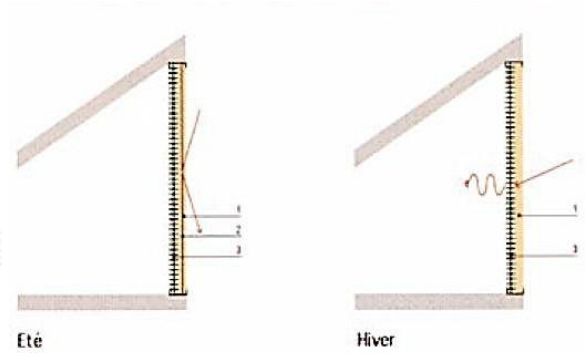


Fig. 30: Esquema estacional de la fachada sur



Fig. 31: Vista externa de la Fachada Sur



Fig. 32: Detalle de la pared con PCM

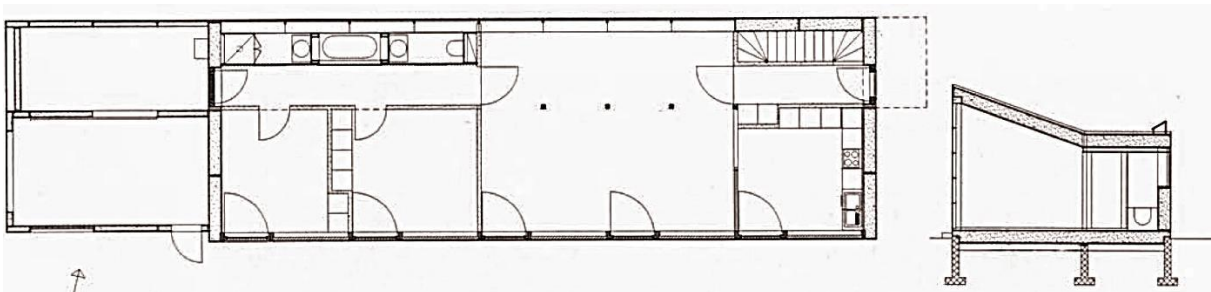


Fig. 33: Planta baja y sección transversal.

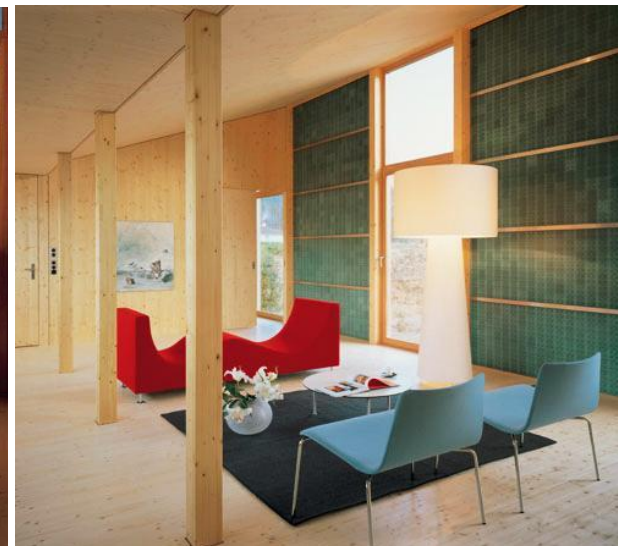


Fig. 34: Vistas Interiores (Fotos: Frédéric Comptess)

## Las viviendas en Domat Ems

A partir del principio desarrollado en la casa de Ebnet-Kappel, el arquitecto desarrolló un sistema de fachada comercializable, que se empleó por primera vez en un proyecto de envergadura de 20 viviendas para ancianos en Domat Ems, Suiza, del 2004.

Es uno de los primeros ejemplos de edificio con estándar Minergie-P, un sello gestionado por la federación helvética que certifica el bajo consumo energético de un edificio respecto a unos parámetros establecidos.

La fachada sur es realizada solo con vidrio y metal y su composición exterior responde a las funciones interiores, o sea las necesidades de los residentes. Como también los muebles, dotados de flexibilidad, para que cada usuario pueda adaptarlo con facilidad.

Todos los apartamentos miran a sur, donde se han empleado 148 metros cuadrados de GlassXcrystal. La fachada abarca también aquí las tres componentes de sistema: aislamiento térmico translucido, acumulador térmico, protección contra la radiación solar en verano.

Un acristalamiento aislante de tres lunas garantiza un factor U inferior a  $0,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Por razones de protección contra incendios, en lugar de parafina se empleó un hidrato de sal, una mezcla de cloruro de calcio, insertado en placas celulares de policarbonato de unos 25 mm, resistentes a la corrosión, de color gris para mejorar la absorción. Hacia el interior, el elemento de la fachada queda protegido por una luna de vidrio templado, que puede ser cubierta con un serigrafiado cerámico. Las temperaturas superficiales de  $26-28^\circ \text{C}$ , proporcionan, como calor de radiación, un mayor confort en el espacio. La transformación de energía solar en energía térmica no solo resulta apreciable, sino también visible, ya que la transparencia del panel aumenta durante el proceso de fusión.

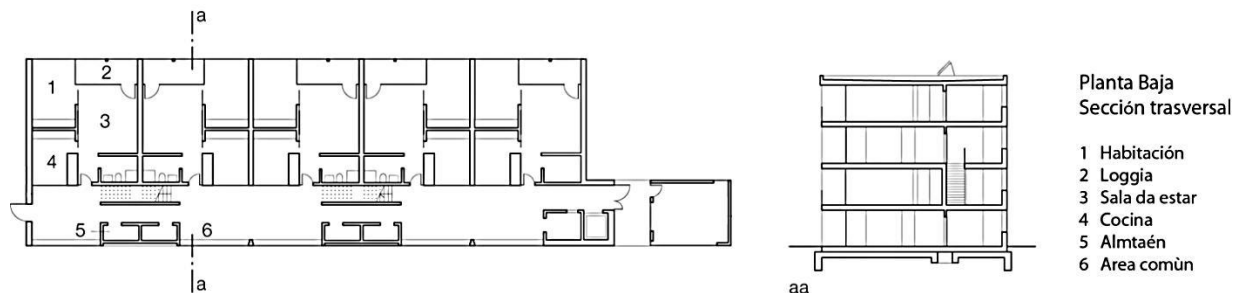
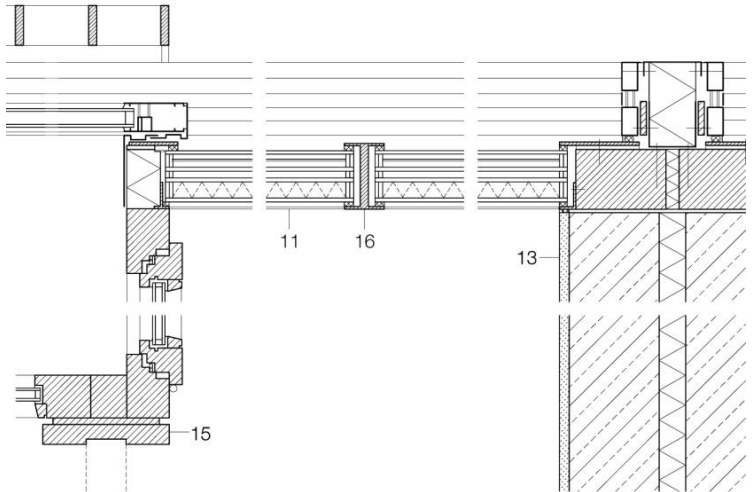


Fig. 35: Vista de la fachada Sur de las viviendas en Domat Ems. Se notan las ventanas tradicionales alternadas con el GlassX





Fig. 36: Vista exterior de la pared con PCM



- |   |  |
|---|--|
| 10 100/65/4 mm aluminium angle fixed to 87/246 mm lam. timber beam (waterproof adhesive)  | 60 mm screed with underfloor heating separating layer                                |
| 11 glazed solar facade ( $U = 0.48 \text{ W/m}^2\text{K}$ ):<br>6 mm toughened glass + 6 mm prismatic glass elements in 20 mm cavity + 6 mm toughened glass + 10 mm cavity + 6 mm toughened glass + thermal storage modules in 24 mm cavity + 6 mm ceramic screen-printed toughened glass | 20 mm impact-sound insulation  |
| 12 floor construction in rooms:<br>10 mm parquet  | 250 mm reinforced concrete floor   |
|   | 75 mm composite thermal insulation system  |
|   | 13 double-skin dividing wall thermally separated                                     |
|   | 14 fixed double glazing in wood frame  |
|   | 15 sliding-door stop   |
|   | 16 welded stainless-steel column:<br>60/4 mm flange; 60/12 mm web;<br>60/3 mm flange |

Fig. 37: Detalle en Planta de la pared con PCM [24]



Fig. 38: Vista interior de una habitación: en primer plano la logia y en segundo la pared con PCM en fase sólida. (Fotos: Gaston Wick)



## Las componentes

Con la información encontrada y con una conversación con el productor, Robert Lueder, he entrado en el detalle, para entender la utilidad de cada capa, de las cuales sigue la descripción y un esquema de las características.

El sistema, utilizado por primera vez en las viviendas Domat Ems, ahora es montado y comercializado por la empresa internacional de vidrios, Saint-Gobain Glass. Los valores de transmisión térmica (U), la transmisión lumínica y las ganancias solares (G) son certificadas por el "Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme", el mayor instituto de investigación solar en Europa.

### GLASSX®crystal

Vidrio temperado de seguridad  
Vidrio prismático con gas inerte  
Vidrio temperado de seguridad bajo emisivo  
Gas inerte  
Vidrio temperado de seguridad bajo emisivo  
Placa de PCM  
Vidrio con serigrafado cerámico opcional

Espesor elemento	62 - 86 mm
Tolerancia del espesor	-1/+4 mm
Espesor del marco	67 - 96 mm
Peso max.	95 kg/m <sup>2</sup>
Superficie max.	6,0 m <sup>2</sup>
Altura max.	3000 mm
Largo max.	2000 mm
Coefficiente de transmisión del calor (U):	hasta 0,48 W/m <sup>2</sup> K
Transmisión lumínica	
PCM fase cristalina	8 - 28 % (3 %)
PCM fase líquida	12 - 44 % (4 %)
Ratio de transferencia total de energía (g):	
radiación vertical directa	
PCM fase cristalina	33 % (4 %)
PCM fase líquida	37 % (4 %)
radiación difusa	29 %
meses de estación invernal	
PCM fase cristalina	33 %
PCM fase líquida	35 %
meses de estación veraniega	
PCM fase cristalina	6 %
PCM fase líquida	9 %
Capacidad de almacenamiento	1185 Wh/m <sup>2</sup>
Temperatura de almacenamiento	26 - 28 °C

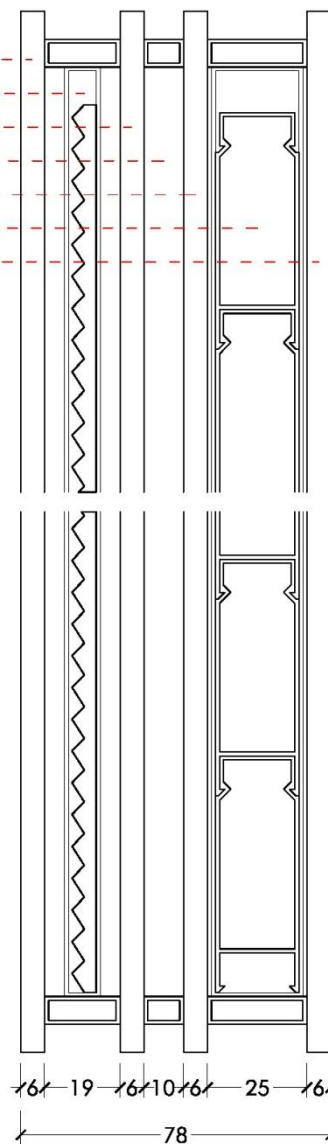


Fig. 39-41: El GlassXcrystal seccionado y dos fases del montaje del cerramiento en el proyecto Marché



1 - La primera capa es un vidrio temperado de 6 mm de seguridad.

2 - La segunda es una cámara de aire, rellena con gas inerte de 19 mm. A su interior hay un vidrio prismático con efecto Fresnel. Es una técnica utilizada en óptica para desviar los rayos de luz, aprovechando la geometría. En principio se usaba para incrementar la luminosidad de los faros, mientras hoy la podemos encontrar en muchos sitios, como en los faros de los coches y cartulinas publicitarias. En este caso su inclinación, de  $46^\circ$  respecto a la horizontal, permite de dejar pasar los rayos con una baja inclinación (invernales), mientras refleja los de verano. El productor ha integrado este sistema porque es muy importante que en verano se rechaza la radiación directa para que los sales cambian de fase y pueden actuar también para refrescar. El productor no quiere que el sistema se venda si esta capa para fachadas exteriores para no permitir que el PCM se deteriore pronto.

3 - Cierra esta capa una luna de vidrio temperado de 6 mm bajo emisivo. Esos tipos de vidrios son usado para el aislamiento térmico: reducen la emisión de la superficie del vidrio, consiguiendo también bajar la pérdida de calor por radiación. Se usan metales como oro, cobre y plata, este último es el más usado porque ofrece el máximo color neutro con gran posibilidad de transmisión lumínica. [26]

4 - Sigue otra cámara de aire rellena de gas inerte. Eso porque los productores son suizos, y han pensado en obtener niveles de U muy bajos. Ellos aseguran que las juntas aguantan unos 20-30 años antes que se pierdan el gas con sus efectos aislantes.

5 - Una tercera luna de vidrio temperado de 6 mm bajo emisivo, cierra esta capa.

6 - En el último intersticio, de unos 25 mm de espesor, se han puesto unos contenedores de un 50 mm de alto y 1 mm de espesor, conectados entre ellos, en policarbonato transparente tendente al gris, para aumentar la capacidad de absorción. Esos bloques, cerrados herméticamente, contienen cloruro de calcio, un hidrato de sal, utilizado como material con cambio de fase. Se necesita un encapsulado impermeable, como los de este tipo, porque las sales hidratadas absorben agua fácilmente. [13]

La temperatura de fusión de este compuesto es entre los 26 y los 28 °C, con una capacidad de almacenamiento de 1185 Wh/m<sup>2</sup> (4200 kJ/m<sup>2</sup>). Teniendo cada metro cuadrado de fachada unos 28 kg de hidrato de sal, la capacidad de almacenamiento másica es de 42 Wh/kg (152 kJ/kg).

Los productores afirman que la sal puede derretirse unas 6000 veces antes que pierde sus propiedades de almacenamiento térmico. Eso quiere decir que puede durar hasta 20-30 años, dependiendo del clima donde se encuentra, o sea de cuantas veces se derriba al año. Tyagi y Buddhi [19] testaron un mezcla parecida ( $\text{CaCl}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ ), averiguando que después de 1000 derribos sigue manteniendo su propiedades, confirmando su posible uso a largo plazo, importante en la construcción.

Es un material isótropo. Los productores afirman que se puede utilizar también inclinado o horizontalmente. Lo único es que todo el sistema debería ser adaptado para satisfacer otras necesidades como seguridad y evacuar las precipitaciones meteorológicas.

7 - La última capa es un vidrio de 6 mm, que a elección del usuario puede ser temperado para una mayor de seguridad y acabado con una serigrafía cerámica.



Fig. 42-43: El GlassXcrystal en el proyecto Marché, de día (derecha) y de noche

## El PCM contenido en el GlassX

Los productores, no desvelando la mezcla del PCM, afirman que la componente principal es cloruro de calcio. Queriendo desarrollar sucesivamente una comparación, necesito saber otras características físicas de este PCM. Desde la conclusiones de Tyagi y Buddhi [15, pág. 327] una mezcla que tiene una temperatura de fusión parecida a la nuestra podría ser:  $\text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Pero presumo que será cloruro de calcio esahidrato ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) porque ha sido el más utilizado en investigaciones [5,11,12,15,19].

El cloruro cálcico o cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) es un compuesto químico, inorgánico y mineral. Viene utilizado junto con agua por sus propiedades de anticongelante, en instalaciones frigoríficas o en las calles. También se utiliza como secante por su gran higroscopicidad. Se usa también en sector alimentario, su nombre como aditivo es E509.

Propiedades físicas: Estado de agregación: Sólido; Apariencia: sólido blanco o incoloro; Densidad: 2150 kg/m<sup>3</sup>; Masa molar: 110,99 g/mol; Punto de fusión: 1045,15 K (772 °C); Punto de ebullición: 2208,15 K (1935 °C) Estructura cristalina: octoédrico, rutilo deformada. Propiedades químicas: Solubilidad en agua: 74,5 g/100 ml (20 °C). Riesgos: Ingestión y ojos: quemaduras; Inhalación y Pie: irritación y quemaduras.

La casi totalidad del cloruro de calcio comercialmente producido se obtiene como subproducto de procesos para la producción de otros compuestos químico, como para el proceso Solvay para la producción de carbonato de sodio. En el caso del GlassX son productos por Dörken [35].

Obtenido como solución acuosa relativamente débil, debe ser concentrado para alcanzar los valores comerciales. Los concentradores del cloruro de calcio son normalmente en forma de evaporadores con película cadente o ascendente, y necesitan una gran cantidad de energía para la formación los cristales.

El cloruro de calcio tiene, en las varias concentraciones, una concentración superior a la fracción de más del compuesto del cristal, es imposible una cristalización clásica y la solución viene concentrada hasta el 70% en peso y entonces refriada por contacto con superficies frías. Se obtiene un sólido en forma de escama de diferentes dimensiones, constituido por cristales de  $\text{CaCl}_2$  con varios niveles de hidratación. Resfriando la solución de cloruro de calcio a presión atmosférica, se precipita hielo hasta el 29,85 %, sale esahidrato ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) hasta el 49,84 %, sale tetrahidrato ( $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) en forma alfa hasta el 52,38 % y en forma beta hasta el 56,63 % monohidrato ( $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) además y hasta la relación stechiometrica  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  de 1.

En la construcción de las instalaciones de concentración de cloruro de calcio, vienen usados normalmente aceros férricos a bajas concentración y temperaturas, aleación de alto contenido de níquel y cromo a media concentración y temperatura a veces sustituido por revestimientos sintéticos, y titanio para temperaturas y concentraciones superiores.

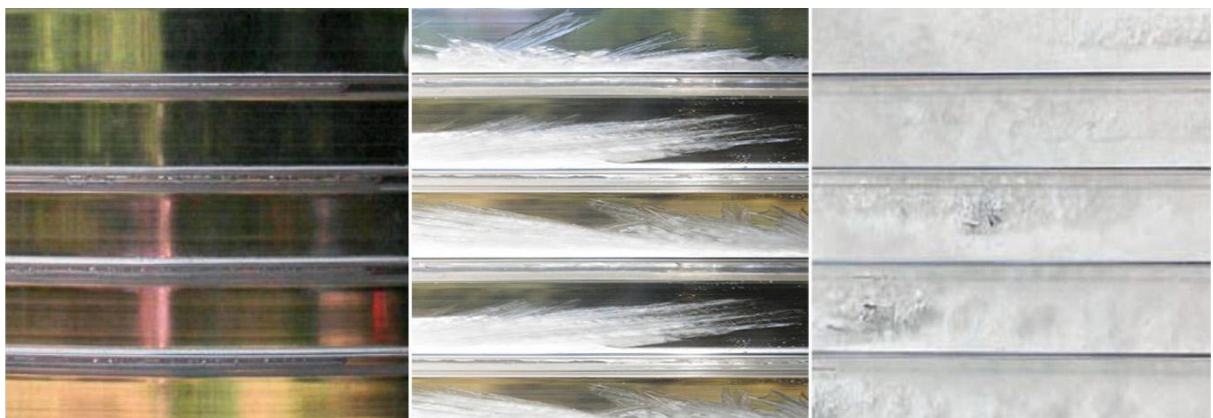


Fig. 44: Diferentes efectos del PCM dentro de la fachada GlassX: líquida, durante la fusión, sólida.



## Los diferentes sistemas GlassX

Los productores han desarrollado otros sistemas de cerramientos, exteriores e interiores, que utilizando en parte las componentes descritas antes.

*GlassXcomfort*: igual a la versión *crystal*, pero sin el vidrio prismático con efecto fresnel.

*GlassXprism*: solo con el prisma y tres capas de vidrio en lugar que cuatro.

*GlassXstore*: solo con la última capa del *crystal*, o sea con dos vidrios y dentro los contenedores con las sales.

Para este último tipo, no se han valorado los valores de transmitancia, porque se ha pensado este producto para un uso interior, ya que sin el vidrio prismático y el aislamiento térmico la sal podría perder sus calidades en poco tiempo.

## Los costes

Los costes no son comparables con una sistema de cerramiento clásico, sea opaco que transparente, no solo para sus altos valores de U, si no por las características energéticas. Siguen los precios indicativos, que pueden bajar un 20% con un orden superior a 60 m<sup>2</sup>:

*GlassXcrystal*: 1000 €/m<sup>2</sup>

*GlassXcomfort*: 865 €/m<sup>2</sup>

*GlassXprism*: 620 €/m<sup>2</sup>

*GlassXstore*: 525 €/m<sup>2</sup>

## Funcionamiento en verano

En verano, el efecto quiere ser el inverso del invierno: refrescar en lugar de calentar. En este caso el PCM funcionaria almacenando el calor en exceso durante el día presente en la habitación, para poderlo descargar durante el enfriamiento nocturno.

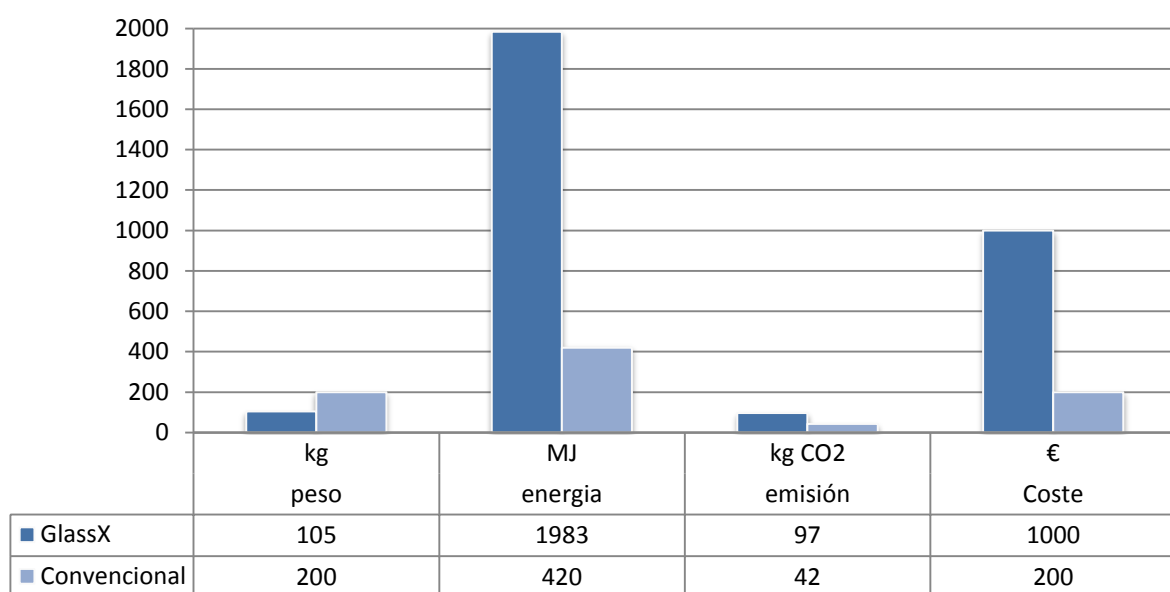
Para hacer esto los productores han pensado en primer lugar de no captar la radiación solar: el vidrio prismático con efecto Fresnel nace con este intento. Esto puede crear una limitación en el utilizzo del sistema respecto a su posición geográfica, donde en latitudes demasiado diferentes de las de Europa central, este puede captar rayos o rechazar rayos útiles para la fusión del PCM. Se podría resolver este problema realizando diferentes vidrios prismáticos respecto a su futuro posicionamiento.

Pero el PCM necesita siempre una diferencia de temperatura alrededor de su punto de fusión para poder funcionar. Entonces funcionaria solo en climas donde el aire exterior durante la noche tenga una temperatura más baja de su punto de fusión, 27 °C. Esta diferencia debería ser bastante alta ya que el sistema GlassX tiene diferentes capas de vidrio que le confieren un alto nivel aislante.

## Impacto ambiental del GlassX

Elenco unas características del GlassX para valorar su impacto ambiental y compararlo con una fachada opaca tradicional, con iguales valores de transmitancia térmica.

Descripción material	Dimensiones				Características Térmicas		Impacto Ambiental		Coste
	densidad $\rho$ kg / m <sup>3</sup>	espesor e m	volumen v m <sup>3</sup>	peso p kg	conductividad $\lambda$ W / m K	transmitancia U W / m <sup>2</sup> K	energía E MJ	emisión kg CO <sub>2</sub>	
Coef. Lam. exterior (he)	-	-	-	-	7,70	0,13	-	-	
vidrio	2500	0,006	0,006	15	1,00	0,01	210	9	
cámara de aire	1	0,019	-	-	0,03	0,73	-	-	
vidrio prismático	2500	0,005	0,005	11	1,00	0,00	158	6	
vidrio b. e.	2500	0,006	0,006	15	1,00	0,01	210	9	
camara de aire	1	0,010	-	-	0,03	0,38	-	-	
vidrio b. e.	2500	0,006	0,006	15	1,00	0,01	210	9	
polycarbonato	1150	0,001	0,004	5	0,23	0,00	537	22	
CaCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O (líquido)	1470	0,019	0,018	28	1,09		108	-	
polycarbonato	1150	0,001	-	-	0,23	0,00	-	-	
vidrio	2500	0,006	0,006	15	1,00	0,01	210	9	
C. laminar interior (hi)	-	-	-	-	25,00	0,04	-	-	
Perfiles Metálicos	2700	0,002	0,000	1			340	28	
<b>GlassX / m<sup>2</sup></b>	<b>-</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>105</b>		<b>0,74</b>	<b>1983</b>	<b>97</b>	<b>1000</b>



La fachada convencional es más pesada respecto al GlassX. Eso porque emplea materiales macizos para el almacenamiento térmico y para el revestimiento exterior.

El impacto ambiental es más alto en la nueva fachada, debido a un alto uso de vidrio, algún metal para la carpintería y el polycarbonato de los contenedores del PCM. Pero la emisiones de CO<sub>2</sub>, son en el doble en la GlassX, eso porque también en la convencional se usan materiales sintéticos.

La fachada convencional es seguramente más barata respecto al GlassX. Es un elemento nuevo y no tiene aún mucha concurrencia en mercado.

## Medición de una aplicación

Los productores de GlassX, han efectuado mediciones sobre el edificio de Domat Ems. Todos los datos han sido tomados por R&D Saint Gobain Securit Herzogenrath, los que lo comercializan.

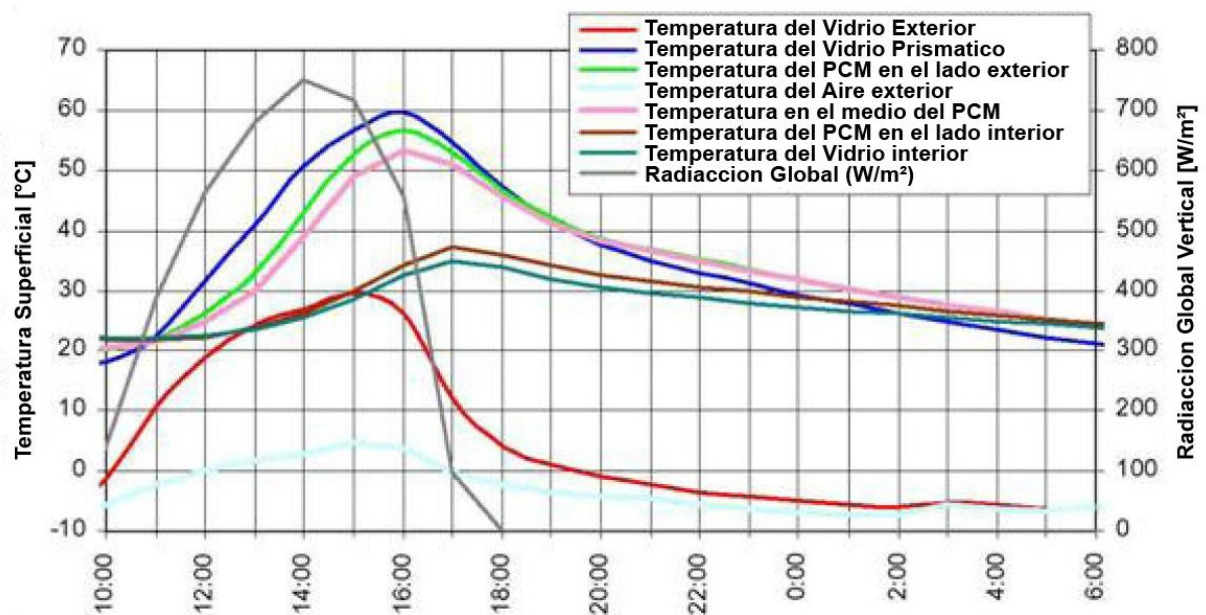
Siguen los gráficos respectivamente de:

Temperaturas en verano y en invierno

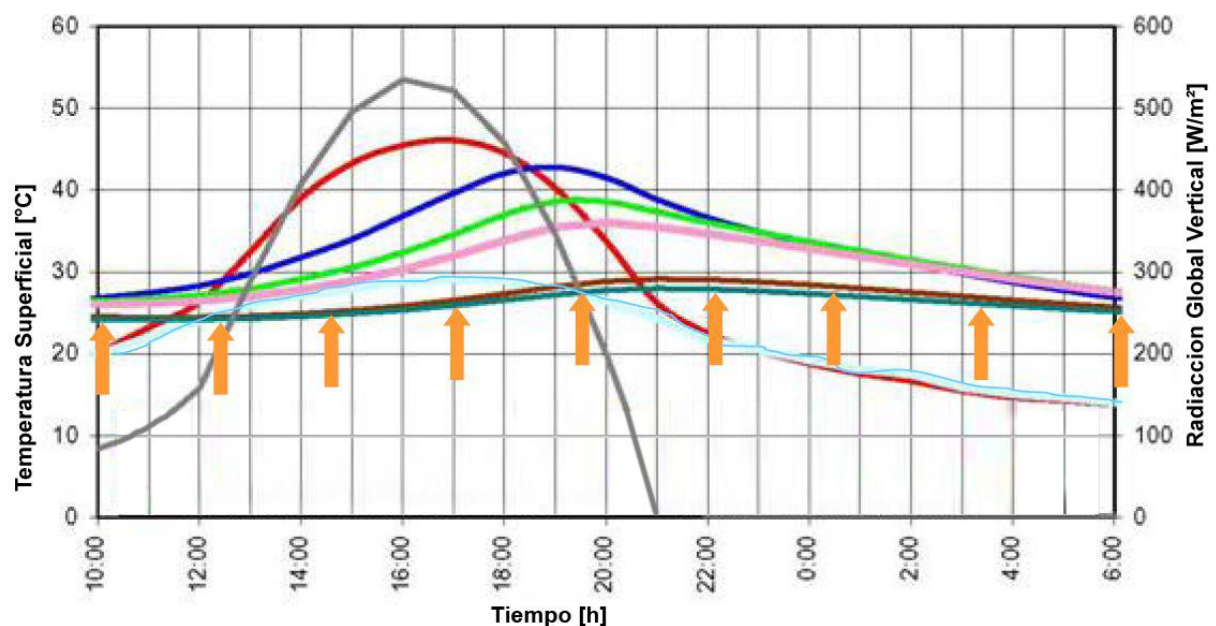
Fase de calentamiento y de enfriamiento

Análisis Comparativa

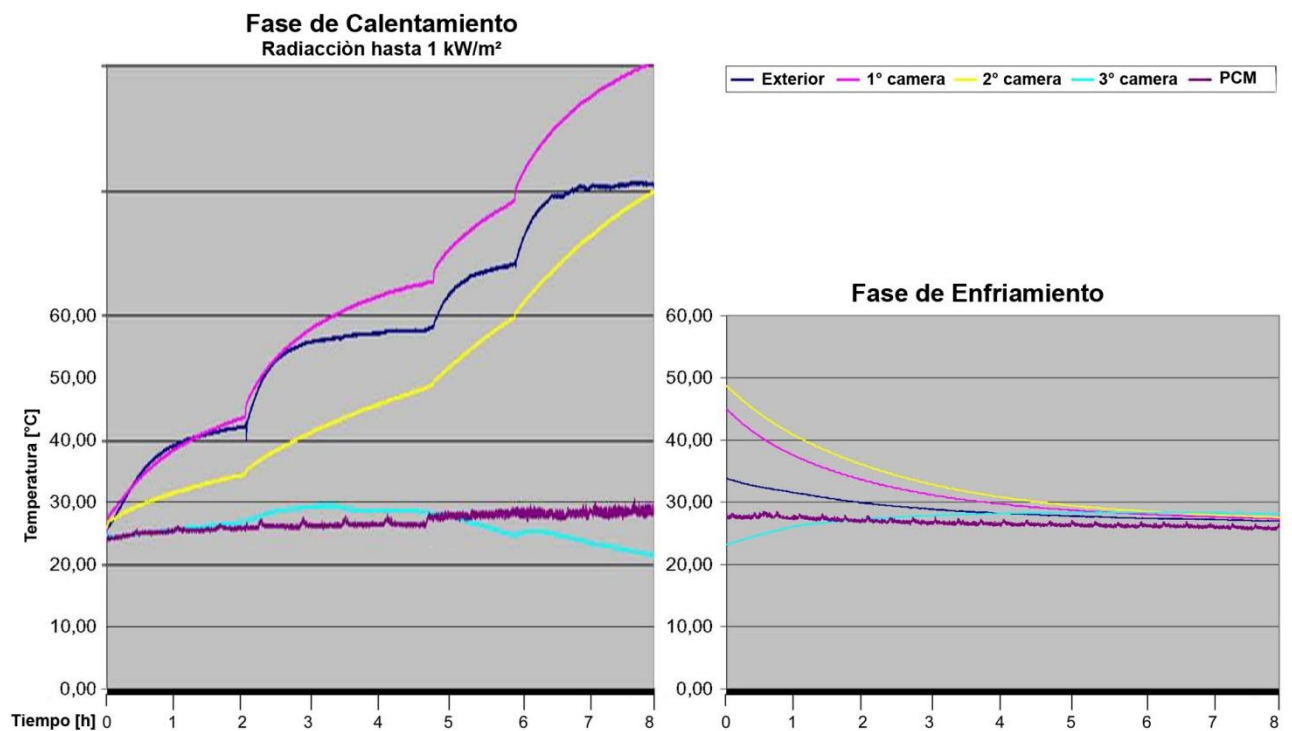
Invierno	T min [°C]	hora	T max [°C]	hora
Temperatura del aire exterior:	- 8	5:00	+ 4	15:00
Temperatura del vidrio interior:	+ 23	10:00	+35	17:00



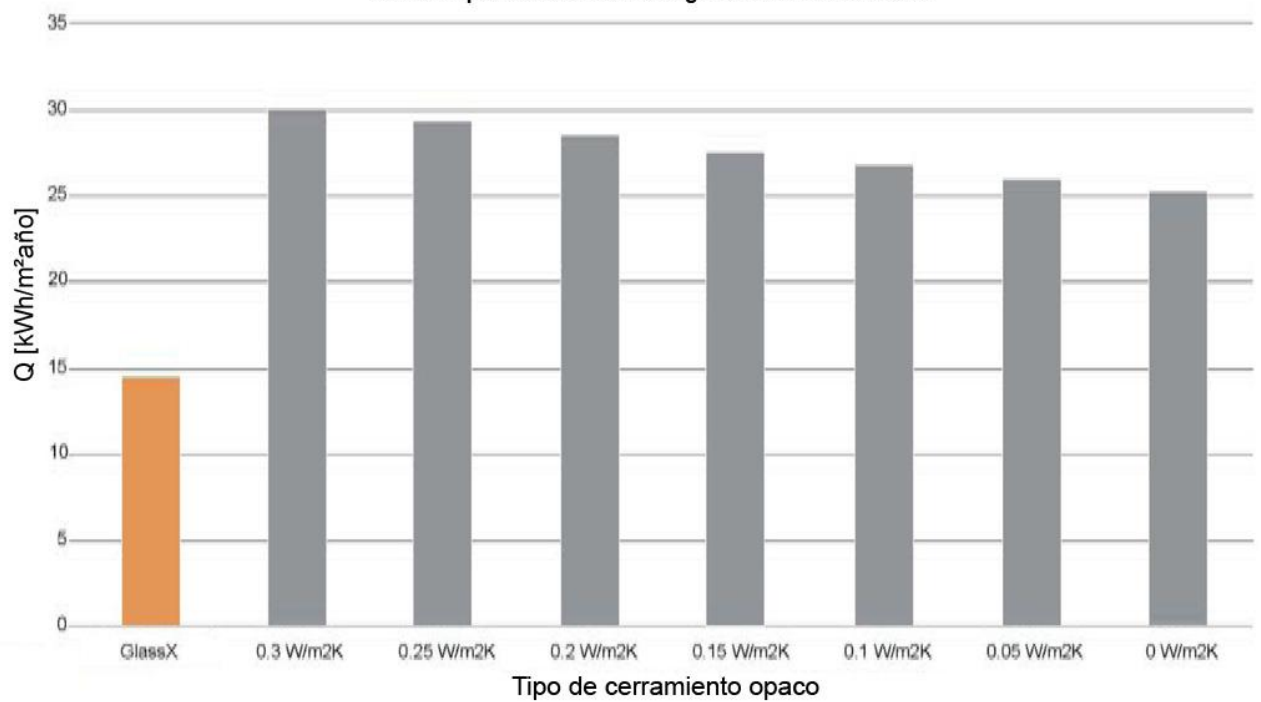
Verano	min [°C]	hora	max [°C]	hora
Temperatura del aire exterior:	+ 14	6:00	+ 30	17:00
Temperatura del vidrio interior:	+ 23	6:00	+ 27	21:00







**Análisis comparativa di diferentes tipos de cerramientos  
respecto a su consumo anual de calentamiento (Q)**  
realizada por el HTA Lucerna segun el estandar SIA 380/1



## 5. Comparación con otros sistemas constructivos similares

Para la asignatura 'Visión del Proyecto', Prof. Helena Coch, del master AEM, diseñamos un pequeño pabellón para un usuario establecido. Trabajando en este proyecto para conseguir la mejor eficiencia pasiva, puse el sistema constructivo del GlassXcristal en la fachada sur, como elemento de captación indirecta.

En este capítulo de la tesina, quiero analizar este muro, con otra forma de sistema de captación indirecta, para luego compararlos respecto a sus características. Es conveniente utilizar esta construcción sea para su función sencilla ya establecido, que para su dimensiones controladas y las características ambientales del entorno ya analizadas.

El sistema que analizaré, además de los con PCM, es el muro invernadero que describiré mas adelante, imponiendo las mismas condiciones de protección solar ya que el GlassX la lleva integrada.

Las propiedades que se evaluarán serán:

- Características térmicas
- Impacto ambiental
- Coste

La transmisión de la luz es una calidad añadida del nuevo sistema con PCM que no podemos comparar con otro existente. Una opción sería hacer una hipótesis de un muro invernadero realizado con LiTraCon o iLight (bloques de hormigón con fibra de vidrio que transmiten la luz). Pero esta hipótesis sería demasiado abstracta porque haremos una comparación entre dos elementos poco investigados. Además los dos sistemas, aunque permitiendo el paso de luz, difícilmente podemos valorarlos desde el punto luminotécnico, dejando esta característica para su aspecto estético.

La comparación final, además de valorar sus aportes al confort interior, también quiere sacar resultados por el punto de vista arquitectónico, intentando en direccionar esos sistemas para un uso más eficiente.

Sigue la descripción del proyecto y del lugar.

### Pabellón en Roma

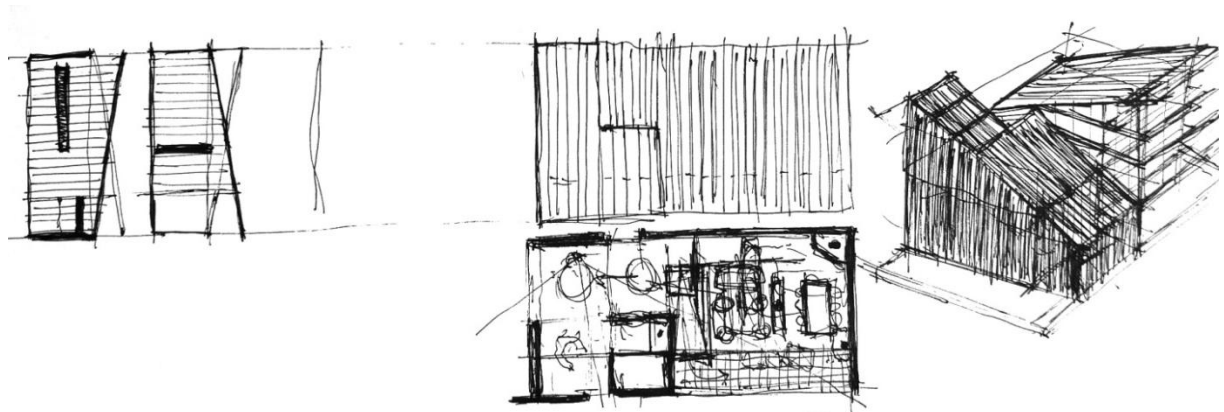


Fig. 45: Croquis de la idea

## Clima

Nepi (Viterbo) | 42°14' N - 12°20' E | 221 msnm | 9 400 Habitantes | 84 km²



Fig. 46-47: Ubicación del pueblo de Nepi donde se desarrollará el proyecto

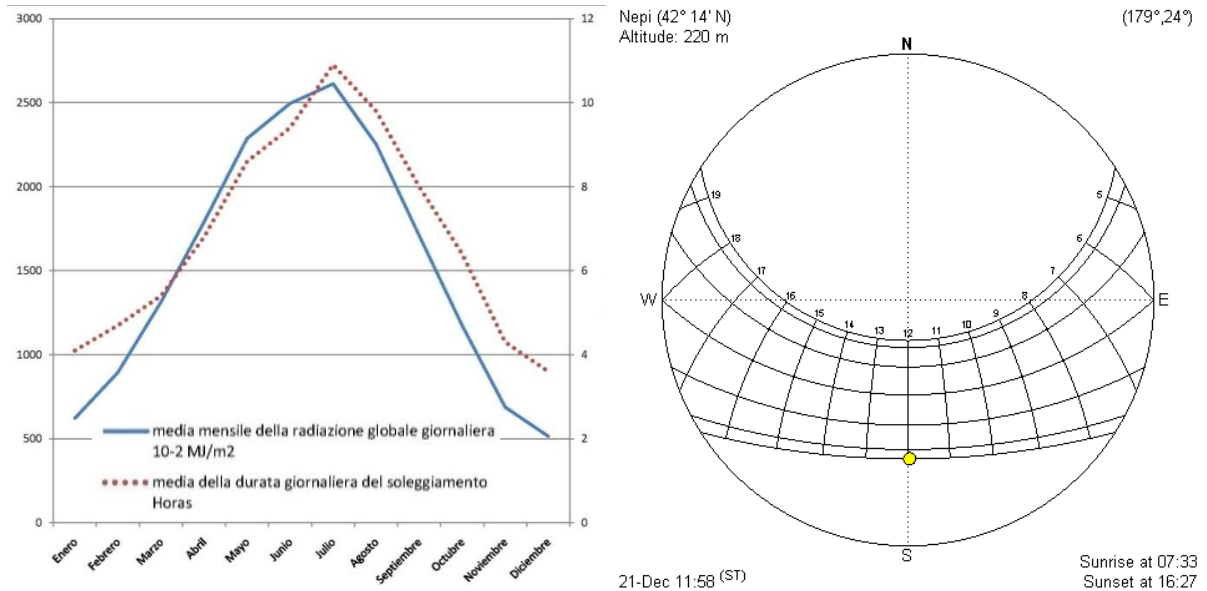


Fig 48-49: Grafico de la radiación solar media y de la hora de soleamiento; El diagrama solar

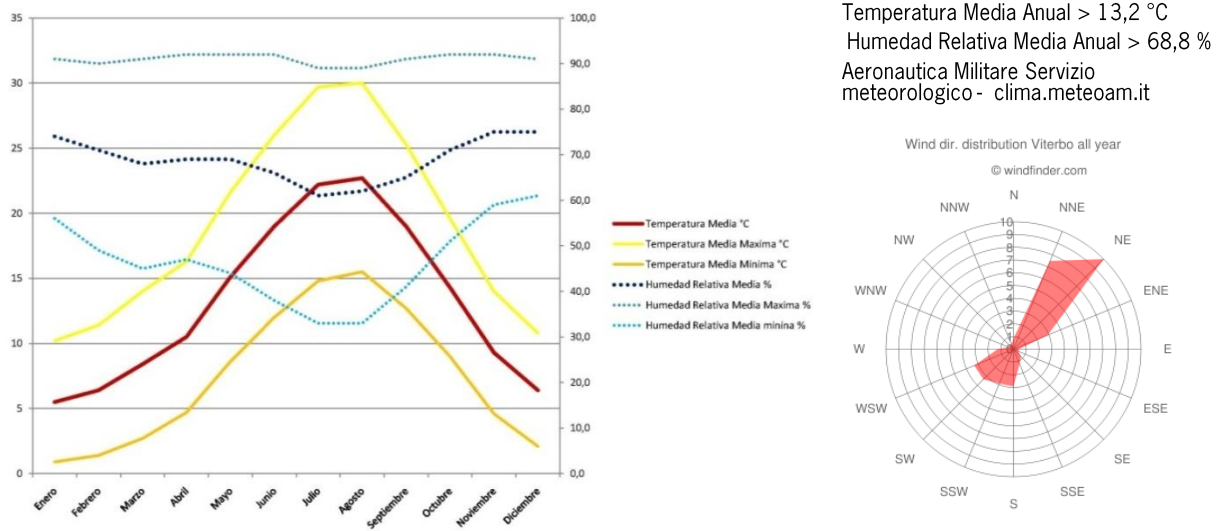


Fig 50-51: Grafico de las temperaturas y humedades medias de Viterbo; La Rosa de los vientos anual de Viterbo



## El proyecto

Me he inspirado en la morfología de la construcción típica con una evolución tecnológica: edificio aislado con estructura en madera de castaño, cubiertas inclinadas de tejas en cerámica para protegerse de las precipitaciones bastante frecuentes, revestimiento en piedra local, el tufo, poroso, ligero, de color marrón claro que con el tiempo se vuelve color verde oscuro, por la fuerte humedad.

En este proyecto la forma y función colaboran juntos: la geometría es modular, creando espacios funcionales (distribuidor, estudio, salón y baño).

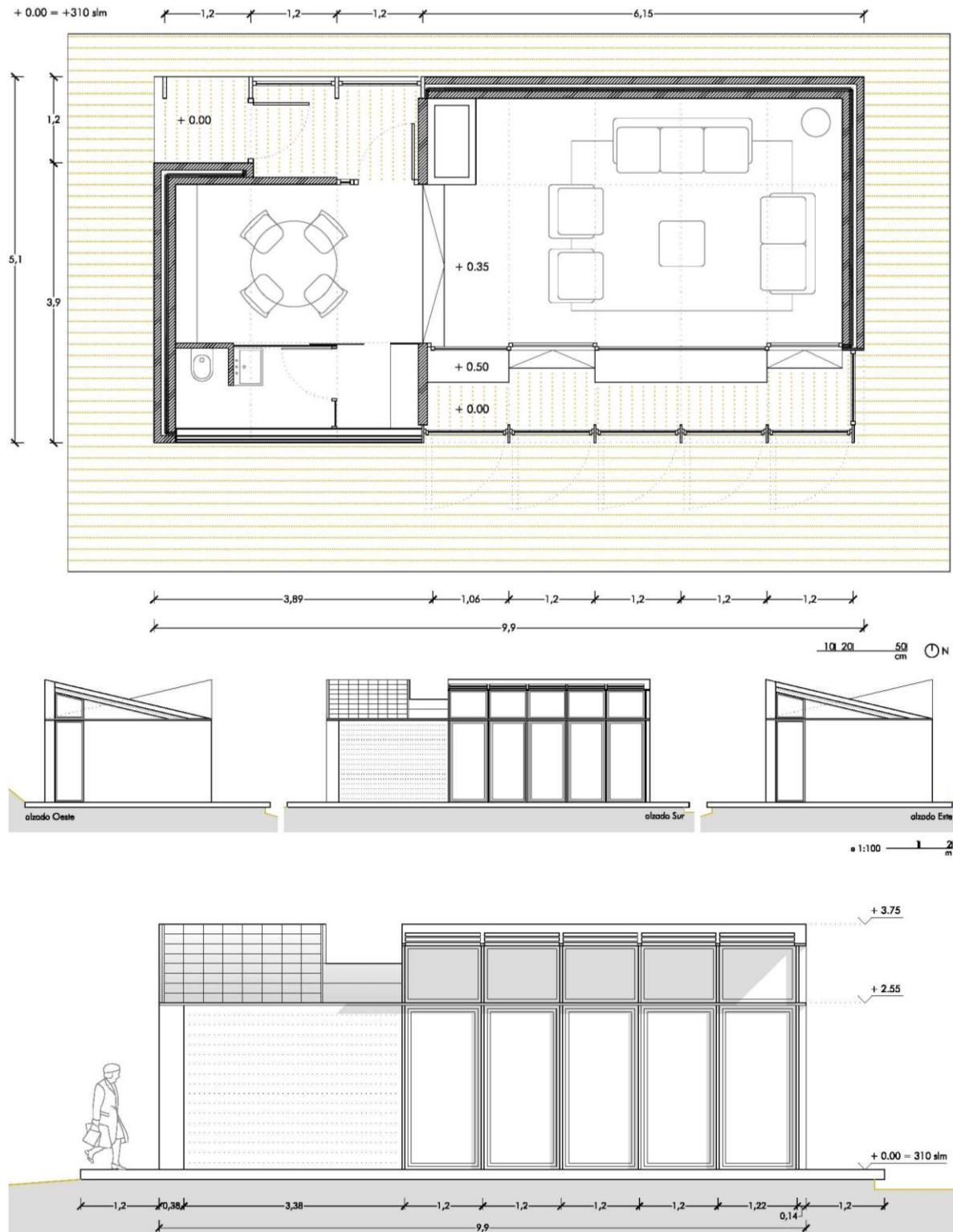


Fig 52-53: Planta principal del Pabellón y sus alzados. En grande la fachada sur donde se pondrán los sistemas captadores

## Los sistemas captadores

La fachada Sur he compuesta en su totalidad con sistemas captadores. La parte derecha, que en el interior representa la sala da estar, tiene una gran invernadero, un sistema semidirecto, que permite de desfrutar la captación solar con poco retardo. Un sistema de porticones verticales permite de poderlo aislar durante la noche invernal y de utilizarlo como alero de protección a la radiación en el periodo veraniego.

Para la parte izquierda he optado para un sistema de captación indirecto. Corresponde a la estancia interna dedicada a un baño con inodoro y lavabo y un pequeño office para la preparación de meriendas y almuerzos. Es un espacio semiabierto que comunica directamente con el estudio del usuario principal. Por esto se ha optado para este tipo de sistema, que aunque funcionando con un retardo relativo, ofrecen un confort de temperatura radiante agradable.

Esta pared es donde quiero comparar los dos sistemas. Es larga en total 3,6 metros, repartida en tres partes de 120 cm y con una altura de poco menos de 2,6 metros. Así que cada pared mide exactamente 3 metros cuadrados (116 cm x 257 cm).

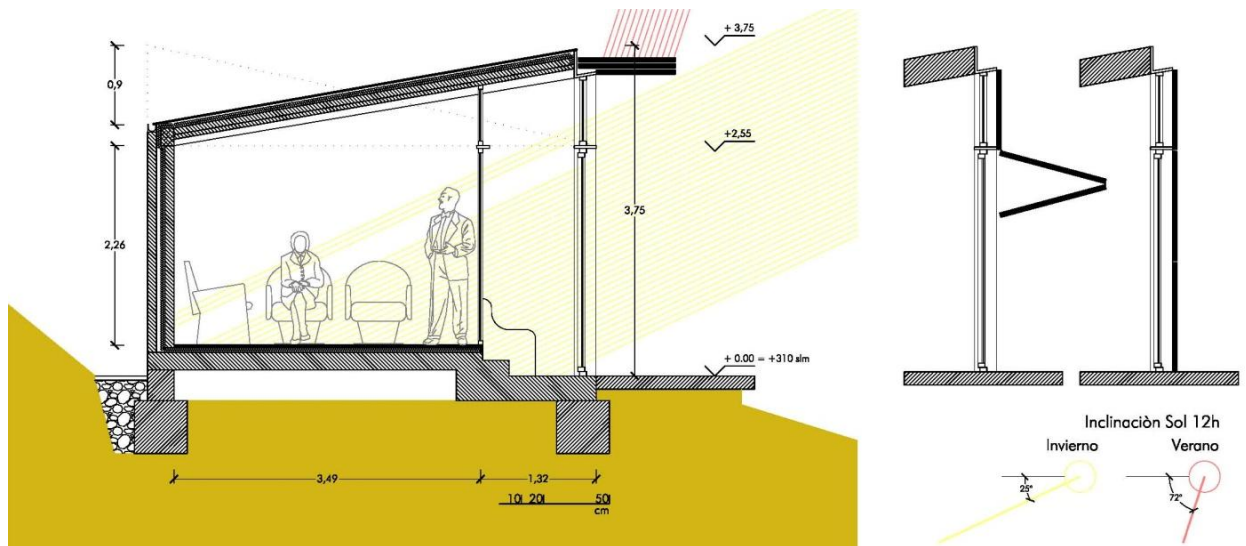


Fig. 54: Sección transversal en el invernadero. Se notan los tres tipos de tejado y el detalle de los porticones



Fig. 55: Vista exterior de la fachada sur

## Material con cambio de fase

El primer sistema es el que contiene PCM, o sea el GlassX cristal que he previamente descrito. Los detalles de conexión con la estructura lo he desarrollado con la comparación de otros proyectos realizados [24].

Para el cálculo, no conociendo exactamente la mezcla que forma el PCM, he utilizado unos valores del  $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ , frecuentemente descrito en diferentes paper y que Tyagi e Buddhi [19] testaron.

Informaciones técnicas, ambientales, económicas [1,2,27,36]

Glass X	Dimensiones				Características Termicas			
	densidad	espesor	volumen	peso	Conduct	Trasmit.	Cal esp	Cal Almac
	$\rho$ kg / m <sup>3</sup>	e m	v m <sup>3</sup>	p kg	$\lambda$ W / m k	U W / m <sup>2</sup> K	$\Delta T=19-35^\circ\text{C}$ J / kg k	Wh
Coef. laminar exterior (he)	-	-	-	-	7,70	0,13		
vidrio	2500	0,006	0,006	15	1,00	0,01		
camara de aire	1	0,019	-	-	0,03	0,73		
vidrio prismático	2500	0,005	0,005	11	1,00	0,00		
vidrio b. e.	2500	0,006	0,006	15	1,00	0,01		
camara de aire	1	0,010	-	-	0,03	0,38		
vidrio b. e.	2500	0,006	0,006	15	1,00	0,01		
polycarbonato	1150	0,001	0,004	5	0,23	0,00		
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (liquido)	1470	0,019	0,018	28	0,54	0,04	2,1	
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (solido)	1470	0,019	0,018	28	1,09		1,4	
polycarbonato	1150	0,001	-	-	0,23	0,00		
vidrio	2500	0,006	0,006	15	1,00	0,01		
Coef. laminar interior (hi)	-	-	-	-	25,00	0,04		
Perfiles Metalicos	2700	0,002	0,000	1				
<b>Glass X / m<sup>2</sup></b>	<b>1333</b>	<b>0,079</b>	<b>0,079</b>	<b>105</b>		<b>0,74</b>		<b>1303</b>
<b>Elemento 3 mq</b>			<b>0,236</b>	<b>314</b>				<b>3910</b>
<b>Total Paredes (3)</b>			<b>0,710</b>	<b>942</b>				<b>11731</b>

GlassX	Energia MJ	Emisión kg CO <sub>2</sub>	Coste €
vidrio	210	9	
camara de aire			
vidrio prismático	158	6	
vidrio b. e.	210	9	
camara de aire			
vidrio b. e.	210	9	
polycarbonato	537	22	
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	108	7	
polycarbonato			
vidrio	210	9	
Perfiles Metalicos	227	18	
<b>Glass X / m<sup>2</sup></b>	<b>1870</b>	<b>88</b>	<b>1000</b>
<b>Elemento 3 mq</b>	<b>5609</b>	<b>263</b>	<b>3000</b>
<b>Total Paredes (3)</b>	<b>16826</b>	<b>789</b>	<b>9000</b>

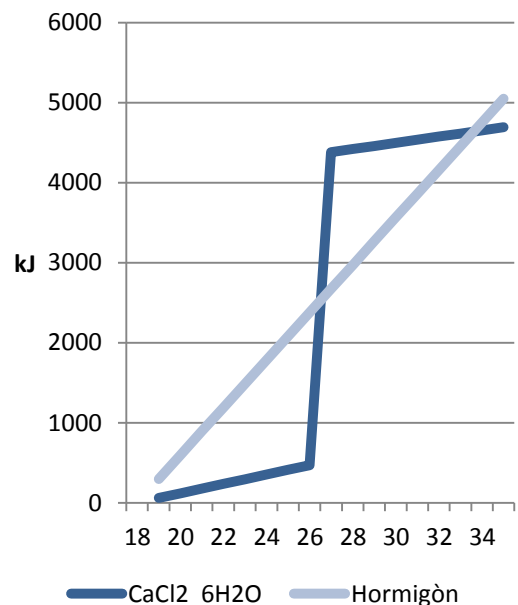
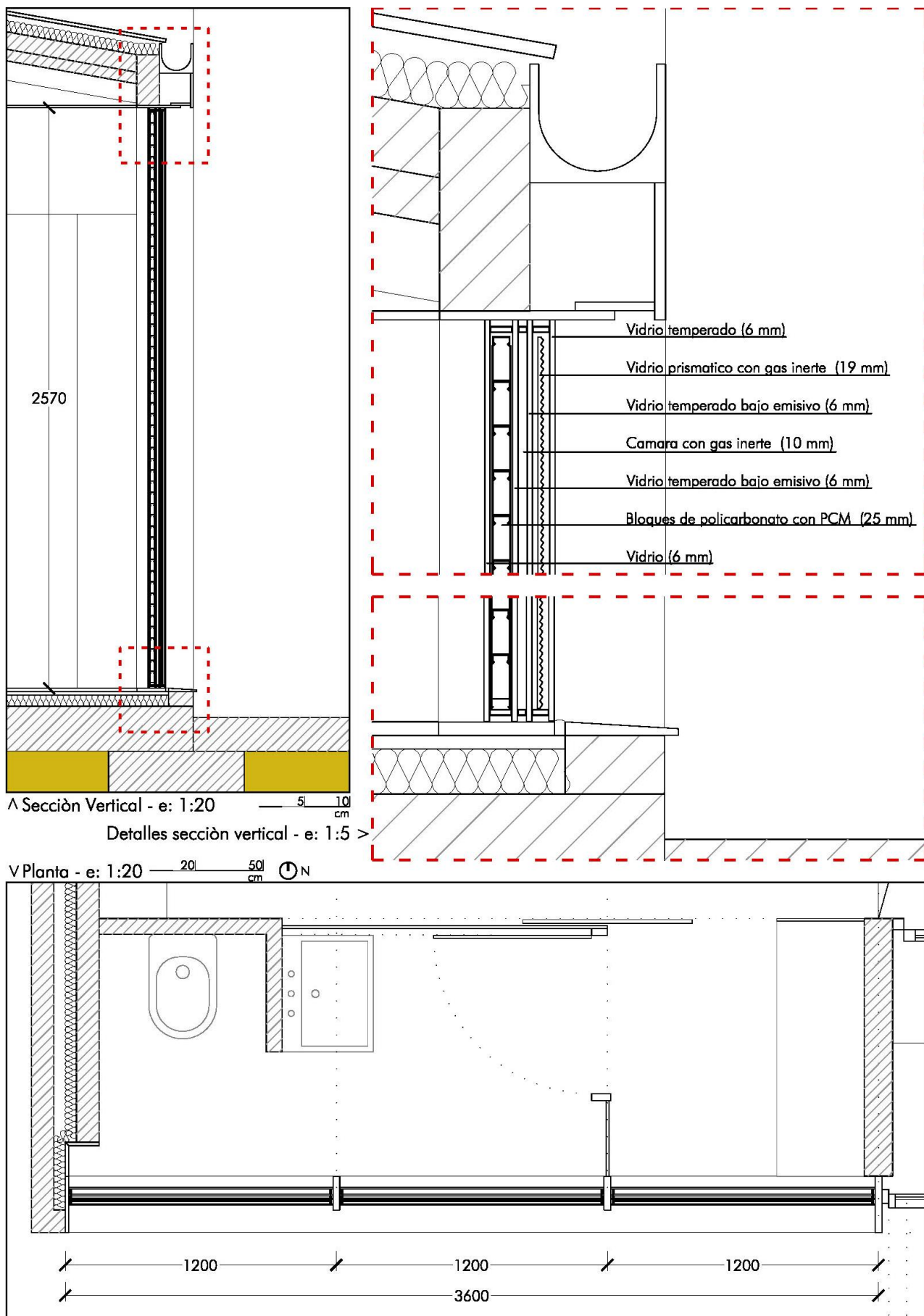


Gráfico del Calor Almacenado entre 19 y 35 °C



## Sección, detalle y planta del muro con material de cambio de fase



Calculo a mano, para valorar la temperatura interna media y su variación diaria en invierno.

El factor de rendimiento del GlassX es un promedio de los muros solares: 0,22 [4]. Es inferior a la del muro Trombe porque falta de ganancia por convección.

<b>Ti</b>	Temperatura Interna	$T_e + (I+D/G)$	<b>16,8 °C</b>
-----------	---------------------	-----------------	----------------

Simbolo	Descrizione	Formula	Valore	Unità
<b>Te</b>	Temperatura media exterior enero		<b>6,1</b>	°C
<b>I</b>	Ganancias medias por radiación solar	$S_{vs} \times R_v$	<b>8,07</b>	W
<b>Rv</b>	Radiación solar media enero		<b>123</b>	W/m <sup>2</sup>
<b>Svs</b>	Superficie equivalente ventana Sur	$(\sum S_i \times Y_i \times C_{ri}) / V_h$	<b>0,07</b>	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
<b>Si</b>	Superficie			m <sup>2</sup>
<b>Yi</b>	Coef. captación			
<b>Cri</b>	Coef. Orientación y obstrucción			
<b>Vh</b>	Volumen		<b>90,35</b>	m <sup>3</sup>
<b>D</b>	Aportes Medio internos	$(\sum n_i \times e_i \times n_{hi}) / (V_h \times 24)$	<b>1,67</b>	W
<b>ni</b>	cantidad aparatos			
<b>ei</b>	potencia aparatos			W
<b>nhi</b>	horas de uso			h
<b>G</b>	Coef. Intercambio termico	$G_t + G_v$	<b>0,91</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Gt</b>	Coef. Intercambio transmisión	$(\sum U_i \times S_i \times a_i) / V_h$	<b>0,77</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Ui</b>	transmitancia			W/m <sup>2</sup> K
<b>ai</b>	coeficiente local			
<b>Gv</b>	Coef. Intercambio ventilación	$G_v = c_{paire} \times r_h$	<b>0,15</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>rh</b>	ricambio horarios	0,5 - 2,5	<b>0,50</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h
<b>cpaire</b>	calor especifico del aire		<b>0,29</b>	kcal / kg × °C

<b>ΔTi</b>	Variazione Temperatura Interna Diaria	$[\Delta T_e + (I+D/G) - (I' + D'/G')] (1 - e^{-t G'/M})$	<b>1,3 °C</b>
------------	---------------------------------------	---	---------------

<b>ΔTe</b>	Variación Temperatura exterior invierno	$T_{media\ Max} + T_{media\ Min} / 3$	<b>4,1</b>	°C
<b>I'</b>	Ganancias medias por radiación solar	I indirectas	<b>3,07</b>	W/m <sup>3</sup>
<b>D'</b>	Aportes Medio internos	$(\sum n_i \times e_i \times n_{hi}) / (V_h \times 12)$	<b>1,96</b>	W/m <sup>3</sup>
<b>G'</b>	Coef. Intercambio termico	$G_t\ noche + G_v / 2$	<b>0,84</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Gt</b>	Coef. Intercambio transmisión de noche	$(\sum U_{in} \times S_i \times a_i) / V_h$	<b>0,77</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Uin</b>	transmitancia de noche			W/m <sup>2</sup> K
<b>ai</b>	alfa - coeficiente orientacion			
<b>M</b>	Masa Termica Unitaria	$(\sum V_i \times \rho_i \times c_{ei} \times ct) / V_h$	<b>296.691</b>	J/m <sup>3</sup> K
<b>Vi</b>	volumen elemento pared			m <sup>3</sup>
<b>pi</b>	densidad elemento pared			kg/m <sup>3</sup>
<b>cei</b>	calor especifico		<b>840</b>	J / Kg K
<b>ct</b>	factor de tiempo	ciclo noche-dia	<b>0,70</b>	
<b>-t</b>	tiempo	16 horas	<b>57600</b>	s

Calculo a mano, para valorar la temperatura interna media y su variación diaria en verano.

<b>Ti</b>	Temperatura Interna	$T_e + (I+D/G)$	<b>22,8 °C</b>
-----------	---------------------	-----------------	----------------

Simbolo	Descrizione	Formula	Valore	Unità
<b>Te</b>	Temperatura media exterior julio		<b>21,3</b>	°C
<b>I</b>	Ganancias medias por radiación solar	$S_{vs} \cdot R_v$	<b>2,07</b>	W/m <sup>3</sup>
<b>Rv</b>	Radiación solar media julio		<b>104</b>	W/m <sup>2</sup>
<b>Svs</b>	Superficie equivalente ventana Sur	$(\sum S_i \times Y_i \times C_{ri}) / V_h$	<b>0,02</b>	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
<b>Si</b>	Superficie			m <sup>2</sup>
<b>Yi</b>	Coef. captación		<b>0,4-0,7</b>	
<b>Cri</b>	Coef. Orientación y obstrucción		<b>1,8-2,2</b>	
<b>Vh</b>	Volumen		<b>90,35</b>	m <sup>3</sup>
<b>D</b>	Aportes Medio internos	$(\sum n_i \times e_i \times n_{hi}) / (V_h \times 24)$	<b>1,67</b>	W/m <sup>3</sup>
<b>ni</b>	cantidad aparatos			
<b>ei</b>	potencia aparatos			W
<b>nhi</b>	horas de uso			h
<b>G</b>	Coef. Intercambio termico	$G_t + G_v$	<b>2,47</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Gt</b>	Coef. Intercambio transmisión	$(\sum S_i \times k_i \times a_i) / V_h$	<b>0,73</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Ui</b>	transmitancia			W/m <sup>2</sup> K
<b>ai</b>	coeficiente local			
<b>Gv</b>	Coef. Intercambio ventilación	$G_v = 0,29 \text{ rh}$	<b>1,74</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>rh</b>	ricambio horarios		<b>6</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h
<b>cpaire</b>	calor especifico del aire		<b>0,29</b>	kcal / kg × °C

<b>ΔTi</b>	Variazione Temperatura Interna Diaria	$[\Delta T_e + (I+D/G) - (I' + D'/G')] (1 - e^{-t \cdot G'/M})$	<b>3,7 °C</b>
------------	---------------------------------------	---	---------------

<b>ΔTe</b>	Variación Temperatura exterior junio	$T_{media \text{ Max}} + T_{media \text{ Min}} / 3$	<b>14,2</b>	°C
<b>I'</b>	Ganancias medias por radiación solar	$I$	<b>1,23</b>	W/m <sup>3</sup>
<b>D'</b>	Aportes Medio internos	$D$	<b>1,96</b>	W/m <sup>3</sup>
<b>G'</b>	Coef. Intercambio termico	$G_t \text{ noche} + G_v / 2$	<b>1,60</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Gt</b>	Coef. Intercambio transmisión de noche	$(\sum U_{in} \times S_i \times a_i) / V_h$	<b>0,73</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Uin</b>	transmitancia de noche			W/m <sup>2</sup> K
<b>ai</b>	alfa - coeficiente orientacion			
<b>M</b>	Masa Termica Unitaria	$(\sum V_i \times \rho_i \times c_{ei} \times c_t) / V_h$	<b>296.691</b>	J/m <sup>3</sup> K
<b>Vi</b>	volumen elemento pared			m <sup>3</sup>
<b>pi</b>	densidad elemento pared			kg/m <sup>3</sup>
<b>cei</b>	calor especifico		<b>840</b>	J / Kg K
<b>ct</b>	factor de tiempo	ciclo noche-dia	<b>0,70</b>	
<b>-t</b>	tiempo	16 horas	<b>57600</b>	s



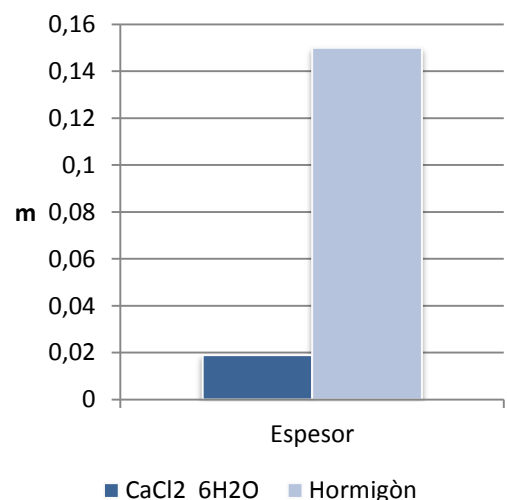
## Muro Trombe

Este sistema lo he diseñado siguiendo el elemento de prueba realizado por Zalewski [21], para poder luego aprovechar sus medidas y cálculos reportados en su informe y en el siguiente [22] donde lo compara con otros tipos de muros solares. Ese tipo particular, que el valora el más eficiente, se llama tipo compuesto y optimiza elementos para reducir las pérdidas térmicas.

En este paper analizado [21] el muro era de unos 134 cm de ancho por 270 cm alto. Para respetar el ritmo del proyecto lo adapto a la medida de 120 cm por 260 cm, actuando una reducción relativa también con los huecos de ventilación. Otro pequeño cambio lo hago en el aislamiento, reduciendo el del ejemplo (7 cm) hasta 5 cm, para adaptarlo a mi situación climática, diferente da la otra más fría. Esa, como el doble vidrio en fachada, es una mejora puesta en acto por los autores para ir contra de las perdidas térmicas con el aire por conducción, cuando el muro se enfría después de unos días invernales con cielo cubierto. Otra innovación respecto al muro tradicional ha sido la de posicionar una hoja de plástico en el hueco inferior para evitar el termosifón invertido, o sea que cuando el muro se queda frío, no permite al aire de la cámara ventilada de salir.

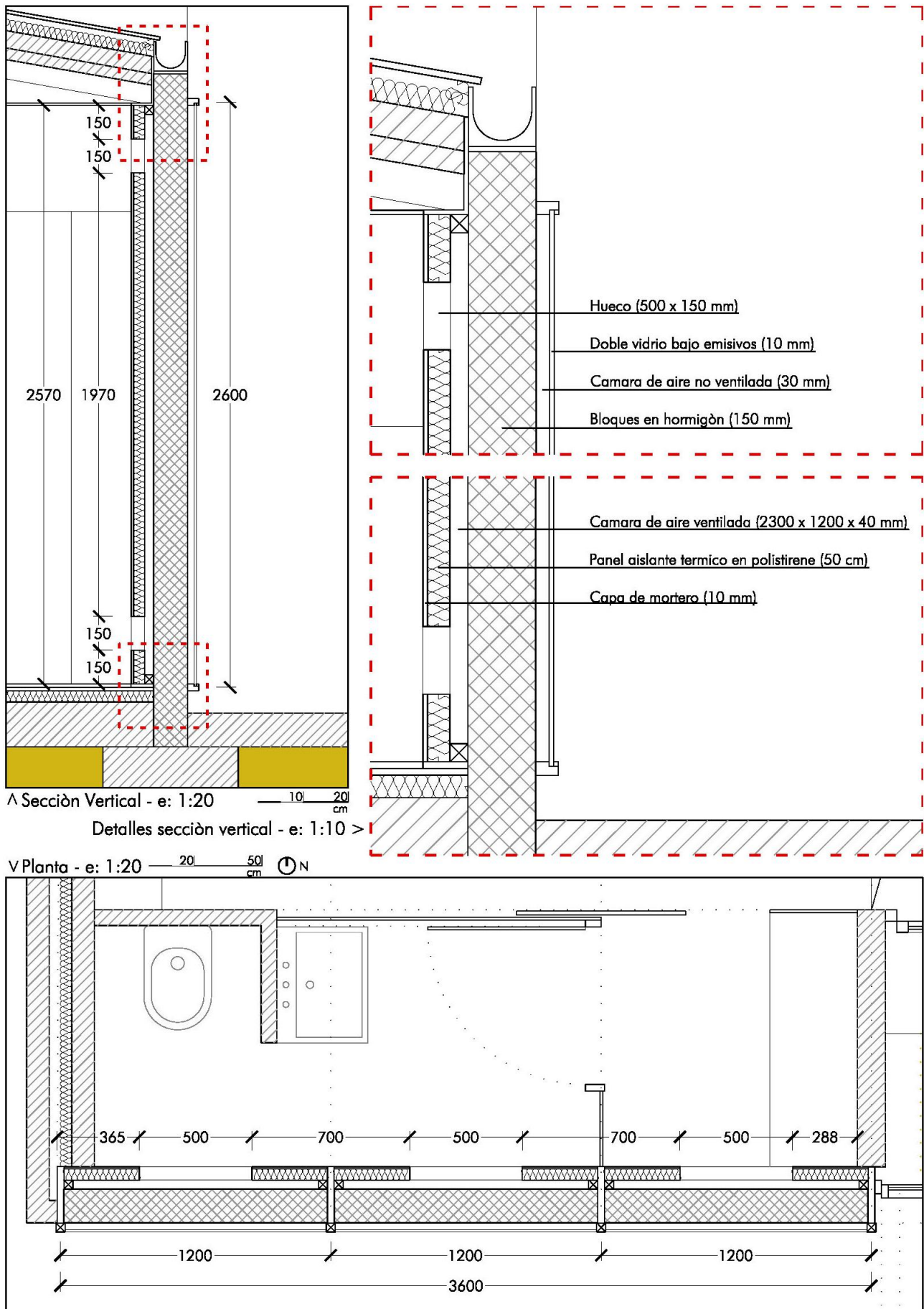
Muro Trombe	densidad $\rho$ kg / m <sup>3</sup>	espesor e m	volumen v m <sup>3</sup>	peso p kg	Conduct $\lambda$ W / m k	Trasmit. U W / m <sup>2</sup> K	Cal esp J / kg k	Cal Almac $\Delta T=19-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ Wh
Coef. laminar exterior (he)	-	-	-	-	7,70	0,13		
vidrio	2500	0,004	0,004	10	1,10	0,00		
camara de aire	1	0,009	-	-	0,03	0,35		
vidrio b. e.	2500	0,006	0,006	15	1,00	0,01		
camera de aire	1	0,030	-	-	-	0,18		
bloques en hormigòn	2250	0,150	0,150	338	1,04	0,14	0,88	83
camara de aire ventilada	1	0,040	0,004	0	-	-		
polistirene	1210	0,050	0,004	5	0,03	1,59		
mortero	2500	0,010	0,010	25	1,04	0,01		
Coef. laminar interior (hi)	-	-	-	-	25,00	0,04		
<b>Muro Trombe / m<sup>2</sup></b>	<b>1312</b>	<b>0,299</b>	<b>0,299</b>	<b>392</b>		<b>0,41</b>		<b>1403</b>
<b>Elemento 3 mq</b>			<b>0,897</b>	<b>1177</b>				<b>4208</b>
<b>Total Paredes (3)</b>			<b>2,690</b>	<b>3531</b>				<b>12623</b>

Muro Trombe	Energía MJ	Emisión kg CO <sub>2</sub>	Coste €
vidrio	140	6	124
camara de aire			
vidrio b. e.	210	9	
camera de aire			
bloques en hormigòn	324	58	76
camara de aire ventilada	0		
polistirene	557	23	60
mortero	15	2	
<b>Muro Trombe / m<sup>2</sup></b>	<b>1246</b>	<b>97</b>	<b>260</b>
<b>Elemento 3 mq</b>	<b>3738</b>	<b>291</b>	<b>780</b>
<b>Total Paredes (3)</b>	<b>11214</b>	<b>873</b>	<b>2340</b>



Los dos espesores para almacenar la misma cantidad de calor

## Sección, detalle y planta del Muro Trombe



Calculo a mano, para valorar la temperatura interna media y su variación diaria en invierno.

Los valores típicos de rendimiento de captación  $r = 0,27$  y del factor de retardo  $f = 0,8$  [4].

<b>Ti</b>	Temperatura Interna	$T_e + (I+D/G)$	<b>17,5 °C</b>
-----------	---------------------	-----------------	----------------

Simbolo	Descrizione	Formula	Valore	Unità
<b>Te</b>	Temperatura media exterior enero		<b>6,1</b>	°C
<b>I</b>	Ganancias medias por radiación solar	$S_{vs} \times R_v$	<b>8,68</b>	W
<b>Rv</b>	Radiación solar media enero		<b>123</b>	W/m <sup>2</sup>
<b>Svs</b>	Superficie equivalente ventana a Sur	$(\sum S_i \times Y_i \times C_{ri}) / V_h$	<b>0,07</b>	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
<b>Si</b>	Superficie			m <sup>2</sup>
<b>Yi</b>	Coef. captación			
<b>Cri</b>	Coef. Orientación y obstrucción			
<b>Vh</b>	Volumen		<b>90,35</b>	m <sup>3</sup>
<b>D</b>	Aportes Medio internos	$(\sum n_i \times e_i \times n_{hi}) / (V_h \times 24)$	<b>1,67</b>	W
<b>ni</b>	cantidad aparatos			
<b>ei</b>	potencia aparatos			W
<b>nhi</b>	horas de uso			h
<b>G</b>	Coef. Intercambio termico	$G_t + G_v$	<b>0,91</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Gt</b>	Coef. Intercambio transmisión	$(\sum U_i \times S_i \times a_i) / V_h$	<b>0,76</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Ui</b>	transmitancia			W/m <sup>2</sup> K
<b>ai</b>	coeficiente local			
<b>Gv</b>	Coef. Intercambio ventilación	$G_v = c_{paire} \times r_h$	<b>0,15</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>rh</b>	ricambio horarios	0,5 - 2,5	<b>0,50</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h
<b>cpaire</b>	calor especifico del aire		<b>0,29</b>	kcal / kg × °C

<b>ΔTi</b>	Variazione Temperatura Interna Diaria	$[\Delta T_e + (I+D/G) - (I' + D'/G')] (1 - e^{-t G'/M})$	<b>3,3 °C</b>
------------	---------------------------------------	---	---------------

<b>ΔTe</b>	Variación Temperatura exterior invierno	$T_{media\ Max} + T_{media\ Min} / 3$	<b>4,1</b>	°C
<b>I'</b>	Ganancias medias por radiación solar	I indirectas	<b>3,68</b>	W/m <sup>3</sup>
<b>D'</b>	Aportes Medio internos	$(\sum n_i \times e_i \times n_{hi}) / (V_h \times 12)$	<b>1,96</b>	W/m <sup>3</sup>
<b>G'</b>	Coef. Intercambio termico	$G_t\ noche + G_v / 2$	<b>0,84</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Gt</b>	Coef. Intercambio transmisión de noche	$(\sum U_{in} \times S_i \times a_i) / V_h$	<b>0,76</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Uin</b>	transmitancia de noche			W/m <sup>2</sup> K
<b>ai</b>	alfa - coeficiente orientacion			
<b>M</b>	Masa Termica Unitaria	$(\sum V_i \times \rho_i \times c_{ei} \times c_t) / V_h$	<b>102.193</b>	J/m <sup>3</sup> K
<b>Vi</b>	volumen elemento pared			m <sup>3</sup>
<b>pi</b>	densidad elemento pared			kg/m <sup>3</sup>
<b>cei</b>	calor especifico		<b>840</b>	J / Kg K
<b>ct</b>	factor de tiempo	ciclo noche-dia	<b>0,70</b>	
<b>-t</b>	tiempo	16 horas	<b>57600</b>	s



Calculo a mano, para valorar la temperatura interna media y su variación diaria en verano.

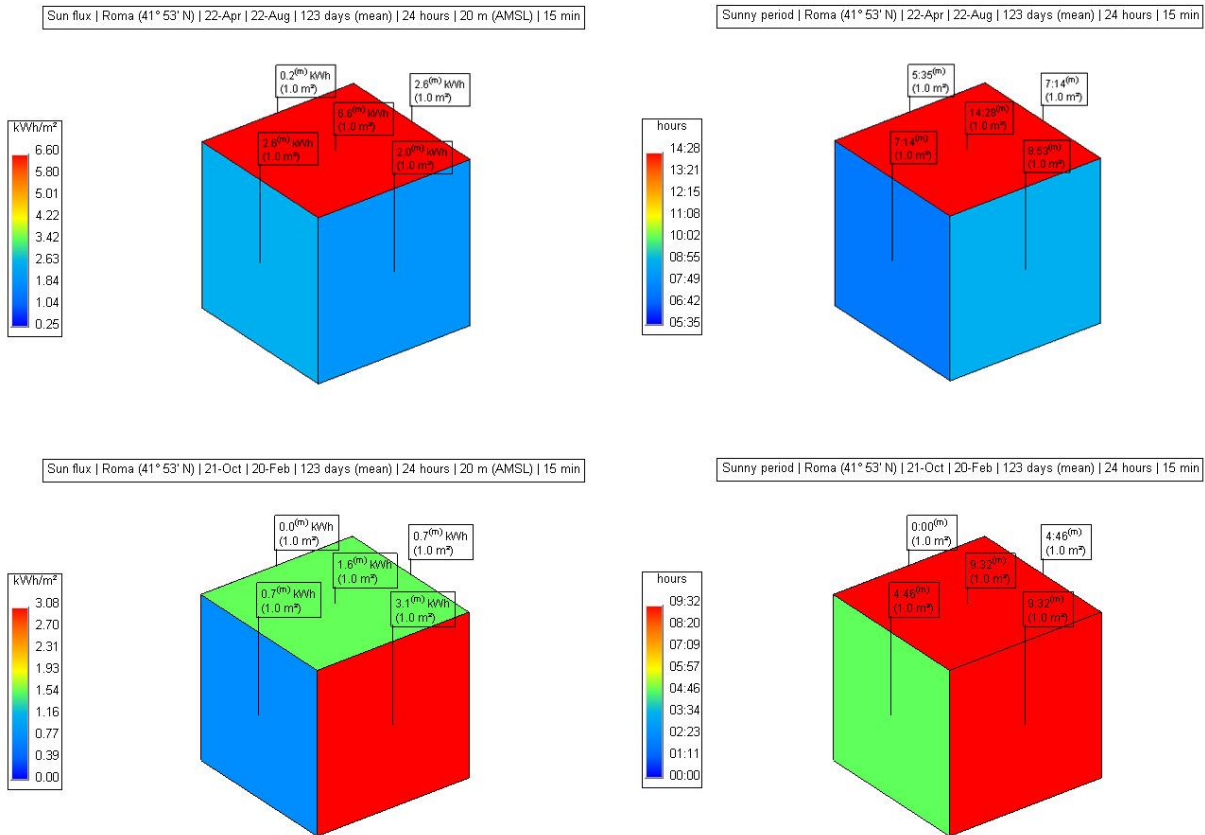
<b>Ti</b>	Temperatura Interna	$T_e + (I+D/G)$	<b>23,0 °C</b>
-----------	---------------------	-----------------	----------------

Simbolo	Descrizione	Formula	Valore	Unità
<b>Te</b>	Temperatura media exterior julio		<b>21,3</b>	°C
<b>I</b>	Ganancias medias por radiación solar	$S_{vs} \cdot R_v$	<b>2,63</b>	W/m <sup>3</sup>
<b>Rv</b>	Radiación solar media julio		<b>104</b>	W/m <sup>2</sup>
<b>Svs</b>	Superficie equivalente ventana a Sur	$(\sum S_i \times Y_i \times C_{ri}) / V_h$	<b>0,03</b>	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
<b>Si</b>	Superficie			m <sup>2</sup>
<b>Yi</b>	Coef. captación		<b>0,4-0,7</b>	
<b>Cri</b>	Coef. Orientación y obstrucción		<b>1,8-2,2</b>	
<b>Vh</b>	Volumen		<b>90,35</b>	m <sup>3</sup>
<b>D</b>	Aportes Medio internos	$(\sum n_i \times e_i \times n_{hi}) / (V_h \times 24)$	<b>1,67</b>	W/m <sup>3</sup>
<b>ni</b>	cantidad aparatos			
<b>ei</b>	potencia aparatos			W
<b>nhi</b>	horas de uso			h
<b>G</b>	Coef. Intercambio termico	$G_t + G_v$	<b>2,47</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Gt</b>	Coef. Intercambio transmisión	$(\sum S_i \times k_i \times a_i) / V_h$	<b>0,73</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>Ui</b>	transmitancia			W/m <sup>2</sup> K
<b>ai</b>	coeficiente local			
<b>Gv</b>	Coef. Intercambio ventilación	$G_v = 0,29 \text{ rh}$	<b>1,74</b>	W/m <sup>3</sup> K
<b>rh</b>	ricambio horarios		<b>6</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h
<b>cpaire</b>	calor especifico del aire		<b>0,29</b>	kcal / kg × °C

<b>ΔTi</b>	Variazione Temperatura Interna Diaria	$[\Delta T_e + (I+D/G) - (I' + D'/G')] (1 - e^{-t \cdot G'/M})$	<b>8,1 °C</b>
------------	---------------------------------------	---	---------------

<b>ΔTe</b>	Variación Temperatura exterior junio	$T_{media \text{ Max}} + T_{media \text{ Min}} / 3$	<b>14,2 °C</b>
<b>I'</b>	Ganancias medias por radiación solar	$I$	<b>1,79</b> W/m <sup>3</sup>
<b>D'</b>	Aportes Medio internos	$D$	<b>1,96</b> W/m <sup>3</sup>
<b>G'</b>	Coef. Intercambio termico	$G_t \text{ noche} + G_v / 2$	<b>1,60</b> W/m <sup>3</sup> K
<b>Gt</b>	Coef. Intercambio transmisión de noche	$(\sum U_{in} \times S_i \times a_i) / V_h$	<b>0,73</b> W/m <sup>3</sup> K
<b>Uin</b>	transmitancia de noche		W/m <sup>2</sup> K
<b>ai</b>	alfa - coeficiente orientacion		
<b>M</b>	Masa Termica Unitaria	$(\sum V_i \times \rho_i \times c_{ei} \times c_t) / V_h$	<b>102.193</b> J/m <sup>3</sup> K
<b>Vi</b>	volumen elemento pared		m <sup>3</sup>
<b>pi</b>	densidad elemento pared		kg/m <sup>3</sup>
<b>cei</b>	calor especifico		<b>840</b> J / Kg K
<b>ct</b>	factor de tiempo	ciclo noche-dia	<b>0,70</b>
<b>-t</b>	tiempo	16 horas	<b>57600</b> s

Para poder evaluar las condiciones de confort durante todo el año he hecho algunos cálculos, después de haber calculado los aportes térmicos solares con el software Heliodon. Aquí siguen uno cubos que muestran los valores de aportes térmicos solares en la latitud de Roma del verano (22 Abril – 22 Agosto) y del invierno (21 octubre-20 Febrero) utilizados para los cálculos siguientes.



Cada metro cuadrado de fachada Sur sin obstrucciones en verano recibe por día 2 kWh, partidos a lo largo de poco menos de 9 horas, con un promedio de 225 Wh. En invierno recibe un promedio de 325 Wh/m², por una durada de cerca 9 h y 30' cada día, o sea 3,1 kWh por día.

De esa radiación incidente en el plan vertical exterior, solo la mitad viene captada por el PCM. Un 40% se pierde en absorción y reflexión de las 4 capas de vidrio más una de policarbonato que la preceden. Queda un 10 % que pasa después de haber cruzado la otra capa de policarbonato y de vidrio que cierra el PCM.

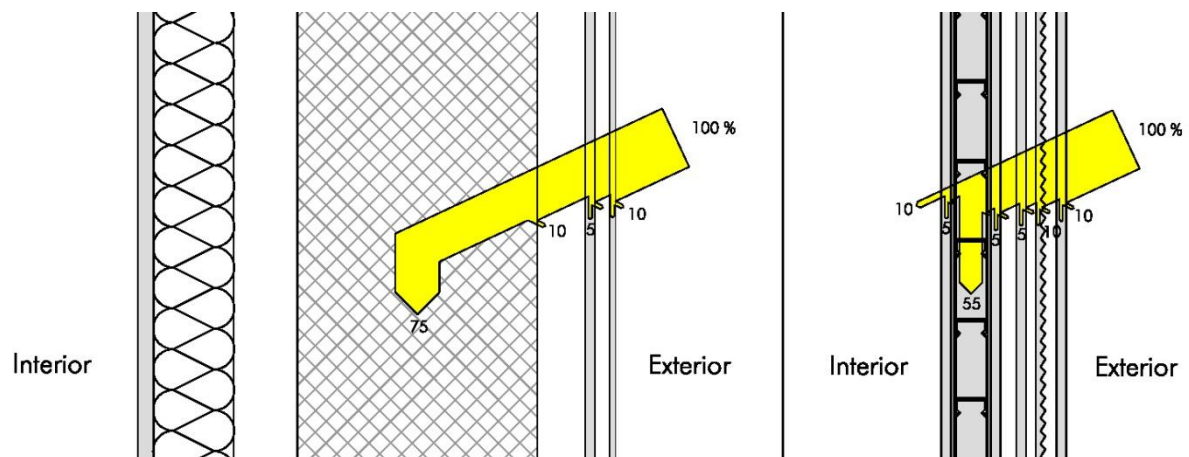


Fig.56: Esquema de captación solar inercial del muro Trombe (derecha) y el GlassX

Con una correcta captación durante un día despejado en invierno, podemos alcanzar de recibir un promedio de 134 Wh/m<sup>2</sup> de radiación solar incidente en la superficie exterior del PCM, o sea 1,3 kWh/m<sup>2</sup> (4580 kJ/m<sup>2</sup>) durante todo el día, cerca de lo que puede almacenar el material, con un total de 11,5 kWh si lo calculamos por las tres paredes de 3 m<sup>2</sup>. Si la temperatura del PCM se encuentra de pocos grados diferente de la fusión del material (26-28 °C), en este caso conseguiría en hacerle cambiar de fase y almacenar todo el calor necesario para completar el cambio de fase. En el caso invernal donde la temperatura exterior es más baja de la de fusión del PCM, ese se encontraría en la fase líquida, teniendo como límite de diferencia de temperatura para alcanzar todo el cambio de fase:

$$\Delta T = E - EI / Cp * \rho * e = 4580 - 3910 / 2,1 * 1470 * 0.019 = 12 \text{ °C}$$

$\Delta T$  = Variación de temperatura en °C

E = calor en kJ / m<sup>2</sup>

EI = calor latente en kJ / m<sup>2</sup>

Cp = calor específico en kJ / kg °C

$\rho$  = densidad en kg / m<sup>3</sup>

e = espesor en m

Ya que la temperatura de fusión es alrededor de los 27 °C, para conseguir que el PCM cambie totalmente de fase tenemos que tener una temperatura mínima del material de 16 °C.

En el caso que limite que el PCM estuviera en una temperatura más baja de 16 °C, difícil porque está bien aislado con el exterior y confinante con un ambiente interior que requiere una temperatura de confort, el material se calentaría rápidamente aunque no alcanzando el completo cambio de fase. Poniendo que se encuentra a 0 °C

$$E = \Delta T * Cp * \rho * e = 27 * 2,1 * 1470 * 0.019 = 1584 \text{ kJ}$$

O sea 440 Wh, que con poco más de una hora de radiación solar estaría ya cambiando de fase.

A revés, poniendo el caso límite que el PCM estuviera ya a una temperatura bastante alta, como al principio del cambio de fase, 26 °C, superada la fase de fusión (3910 kJ) los restantes calentarían más rápidamente el material que en la fase líquida porque el Cp en la fase sólida es más bajo:

$$\Delta T = E / Cp * \rho * e = 4580 - 3910 / 1,4 * 1470 * 0.019 = 17 \text{ °C}$$

En verano tendríamos una situación diferente, porque el PCM está protegido por los rayos solares gracias al vidrio prismático con efecto Fresnel. Entonces la variación de temperatura del PCM está relacionada con los intercambios térmicos por conducción y radiación difundida.

En la fig. 57 se ha simulado la situación límite en invierno para que el PCM complete su cambio de fase. Mientras el diagrama del verano enseña una posible variación diaria en las temperaturas de confort

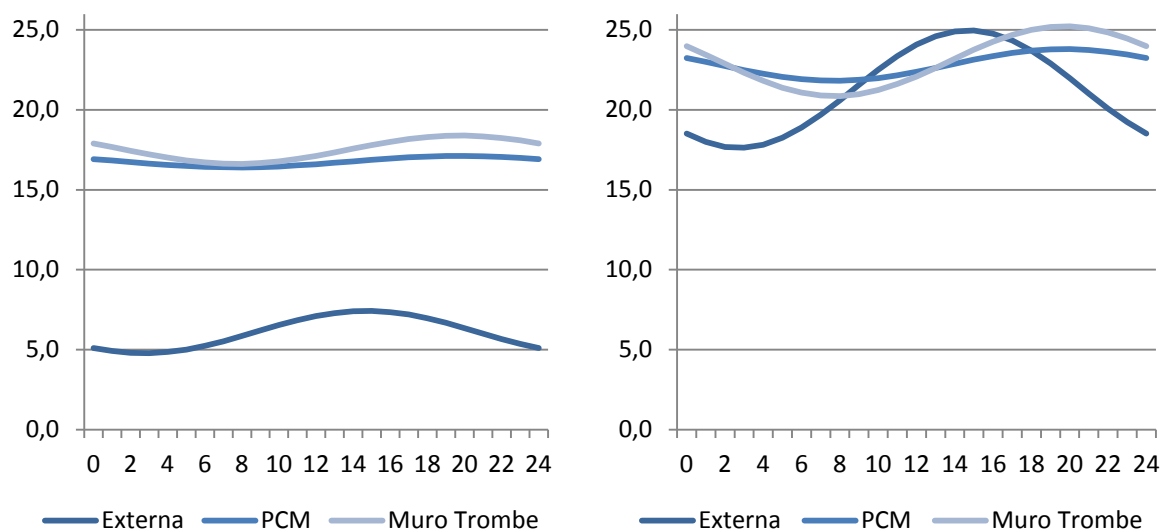
En el Muro Trombe, teniendo solo una doble capa de vidrio, tenemos menos pérdidas por absorción y reflexión, alrededor de un 25 %, así que el que sobra, cerca 250 Wh/m<sup>2</sup>, viene captado por el muro. Cada día alcanza una captación de 2,2 kWh / m<sup>2</sup>, o sea 20 kWh para las tres paredes. Esto consigue en subir la temperatura superficial exterior de la pared de:

$$\Delta T = E / Cp * \rho * e = 8550 / 0.880 * 2250 * 0.15 = 29 \text{ °C}$$



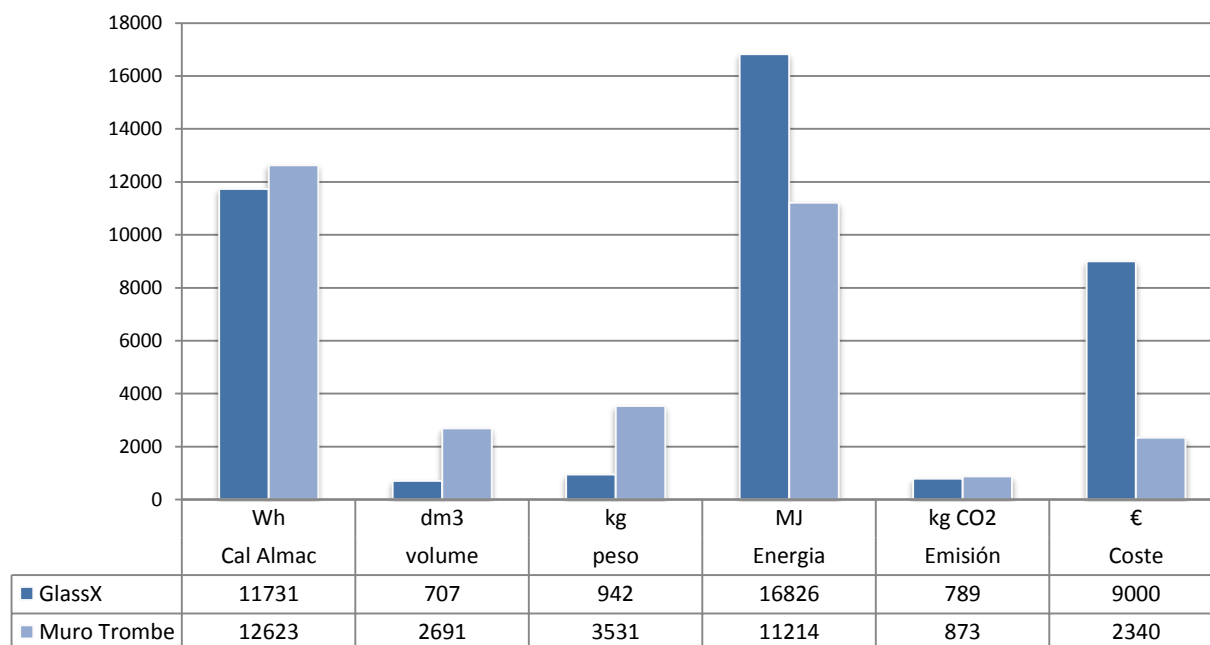
## Comparación

Comparación entre las temperaturas interiores del pabellón en invierno (derecha) y verano.



Los dos sistemas ofrecen una buena capacidad de captación y mejoran las temperaturas interiores, aunque en el periodo invernal, no entran en la condición de confort. Eso puede ser porque la superficie de las paredes es demasiado pequeña respecto a la otra. La variación de temperatura es buena en los dos casos, de poco mejor la con PCM, demostrando su calidad térmica.

Comparación entre las diferentes características de los dos cerramientos exteriores analizados.



El Muro Trombe, sigue las expectativas y demuestra de tener calidades sea en almacenamiento térmico que en el coste.

El GlassX pero enseña que, aunque con un impacto ambiental poco superior, el precio que se paga de más se puede ahorrar en el peso por la estructura portante, ahorrando volumen.

## 6. Dos demostraciones con PCM

Para poder evaluar la eficiencia de un tipo de PCM, pongo en acto dos demostraciones con unas muestras de Energain de la DuPont: 210 x 150 x 5 mm: 0,12 m<sup>2</sup>; 0,14 kg cada una: 0,57 kg total – 12.6 Wh almacenamiento térmico total.

Las demostraciones quieren evaluar si en presencia de ese material se puede averiguar un real estacionamiento de las temperaturas alrededor de las de fusión del material. Para hacer esto se medirán las temperaturas de dos cajas, una con Energain con otra sin nada.

Como he hablado en el capítulo del estado del arte, la multinacional DuPont, ha realizado una placa con el nombre Energain compuesta por dos capas de aluminio de 0,13 mm con dentro 5 mm de una mezcla de etileno con base polímero (ethylene based polymer) (40%) y una cera de parafina microencapsulada (60%). Las placas tienen un tamaño de 100 por 120 cm, y pueden ser cortadas a medida y selladas con un celo de aluminio para colocarlas en tabiques y falso techos. El punto de fusión es de 21,7 °C y la capacidad de almacenamiento es de 70 kJ/kg. [32]

La función de estas placas es añadir inercia térmica en los edificios, estabilizando el calor en exceso, o sea, cuando la temperatura sube y se acerca al punto de fusión, ese material cambia fase, pasando desde líquido a sólido, absorbiendo calor, hasta que llega a su saturación. Cuando la temperatura vuelve a bajar, el PCM devuelve el calor lentamente, consiguiendo en estabilizar la temperatura alrededor del punto de fusión que se acerca a la de confort.

### Primera demostración

El tamaño del contenedor ha sido diseñado respecto a la dimensión de la muestra, añadiendo un poco de área para posicionar una botella en PET con agua congelada dentro. Eso porqué en verano la temperatura del aire en Roma varía entre los 24 y los 36 °C, así que es imposible realizarlo en un ambiente real. Por esto he creado una caja cerrada de 720 x 560 mm, partida para crear dos partes diferentes. La base, las paredes y el divisorio del centro son en poliestireno extruido de 30 mm, mientras la parte de arriba es una capa de vidrio transparente de 2 mm, para poder visualizar la temperatura interior medida por dos termómetros diferente, uno con mercurio, otro digital estándar. Otro termómetro es el de la casa posicionado en la misma habitación, siempre digital, para medir la temperatura del ambiente donde se desarrolla la demostración. Para evitar que haya muchas pérdidas, pongo diferentes paños en los bordes donde se apoya el vidrio, disminuyendo así los puentes térmicos. En fin una manta en poliéster, para permitir de levantarla para tomar las mediciones, cubre toda la caja, que está apoyada encima de una cama, consiguiendo de esa forma un aislamiento elevado.

Esto quiere simular un rango día-noche-día, empezando desde la temperatura del aire para luego enfriarla con el hielo y cuando este último se ha deshecho, vuelve a calentarse hasta estabilizarse con la temperatura del aire. La demostración es positiva si la parte con Energain consigue en ralentizar sea la bajada de la temperatura que su subida, respecto a la sin PCM.

La demostración ha sido realizada en una habitación privada en Roma, el 23 Agosto del 2011, entre las 9:00 y la 22:00 horas, tomando nota de las tres temperaturas cada 15 min. La temperatura externa ha variado entre los 29 y los 36 °C, y la temperatura interna entre 27 y 29 °C.

En la fig.58 se explica todo el contenedor objeto de la demostración.

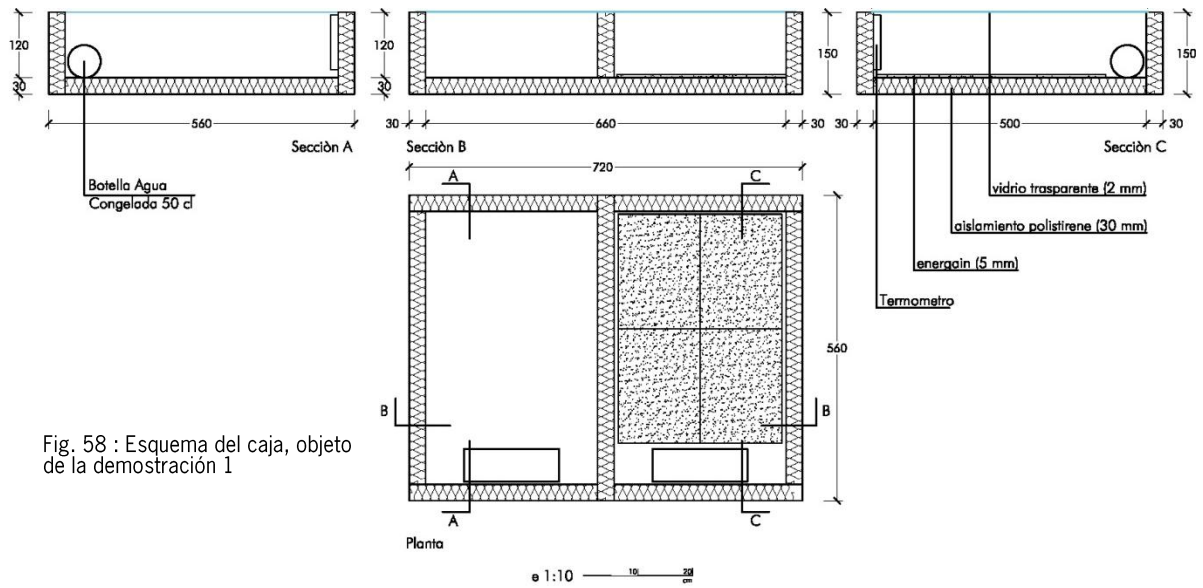


Fig. 58 : Esquema del caja, objeto de la demostración 1

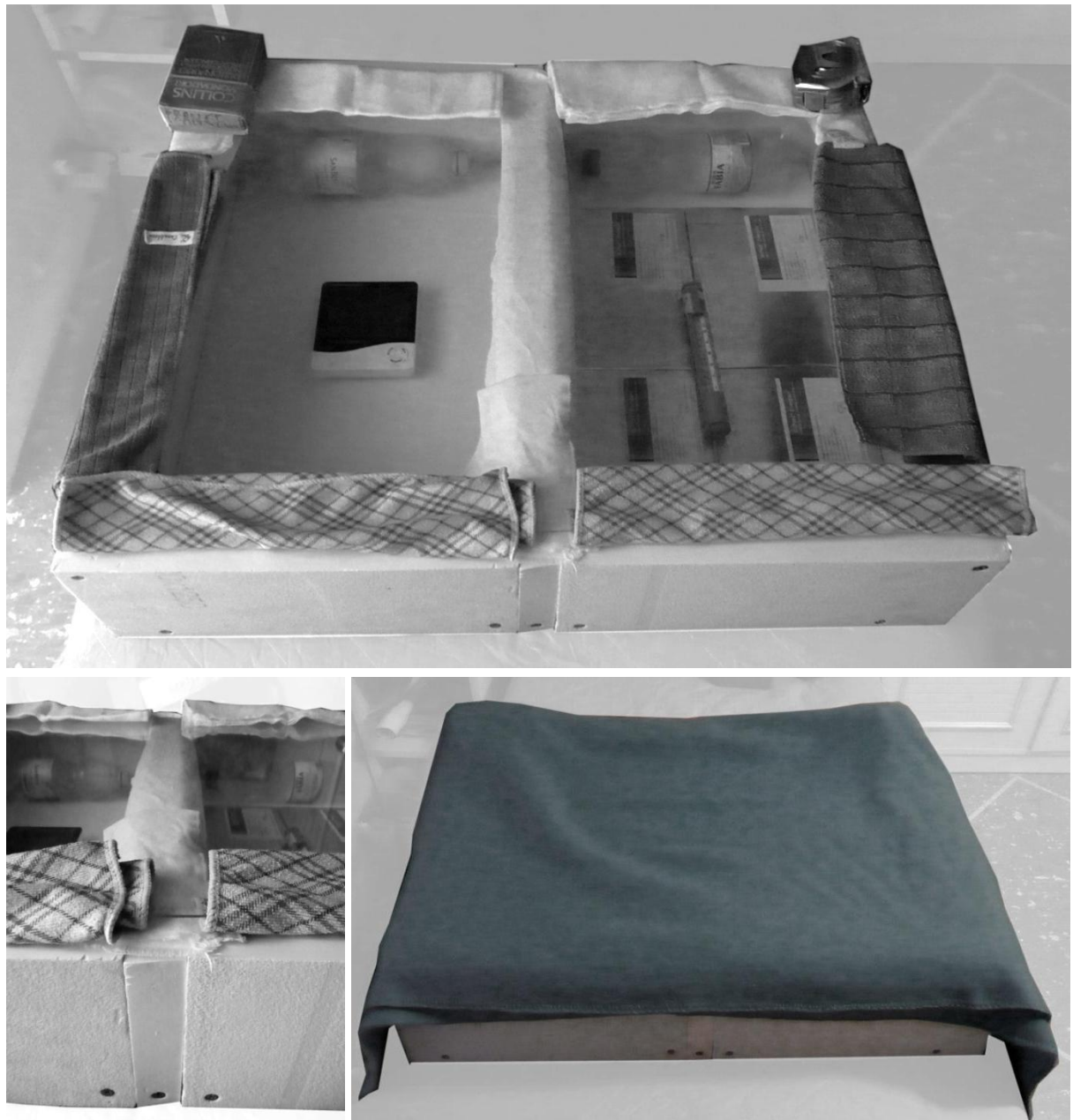
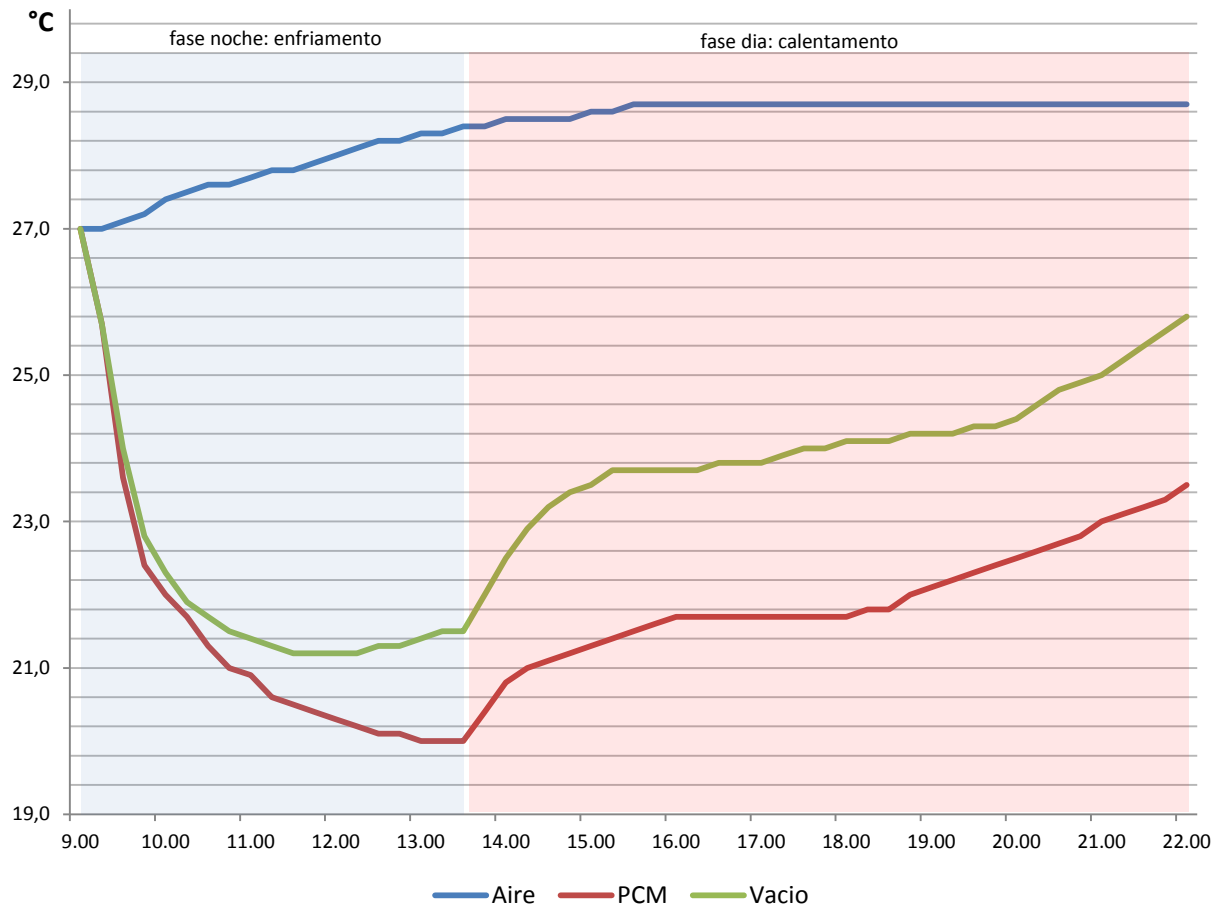


Fig. 59 fotos de la caja en su conjunto, un detalle de las esquinas y con la manta.



En el gráfico siguiente, corregido para nivelar las diferencias entre los termómetros, se enseñan los andamios de las tres temperaturas.



La temperatura de la caja ha bajado rápidamente cuando he puesto la botella de agua congelada para crear la fase 'noche', partiendo desde 27 °C presentes en la habitación, hasta llegar unas 5 horas más tardes rozando los 21 °C en el caso de la parte vacía y 20 °C en la con PCM. Después de las mediciones de las 13:30, constatando que difícilmente habría alcanzado una temperatura más baja y que la temperatura había superado la de fusión del PCM, quito la manta que cubre el vidrio, para empezar la fase 'día'. La temperatura vuelve a subir y se nota que la temperatura de la parte con PCM es más estable y atenúa la subida de temperatura, estabilizándose por más de dos horas alrededor de los 21,7 °C.

La demostración está satisfecha en parte: el material ha conseguido en estabilizar la temperatura alrededor de la de fusión del PCM solo en la fase de 'día' o sea de calentamiento. No se ha notado diferencia de comportamiento en la fase de 'noche' o sea de enfriamiento, llegando a temperaturas más bajas de la otra caja vacías. Eso ha sido causado probablemente por pequeñas diferencias de pérdidas térmicas o errores en las herramientas de medición, pero no aclara porqué el PCM no ha devuelto el calor en exceso durante el enfriamiento y si en la de calentamiento. Por esto hago otra demostración poco más desarrollada.

## Secunda demostración

Quiere mejorar la demostración antecedente acercándola a una condición real, intentando en uniformar los aportes internos de la caja y añadiendo aportes externos.

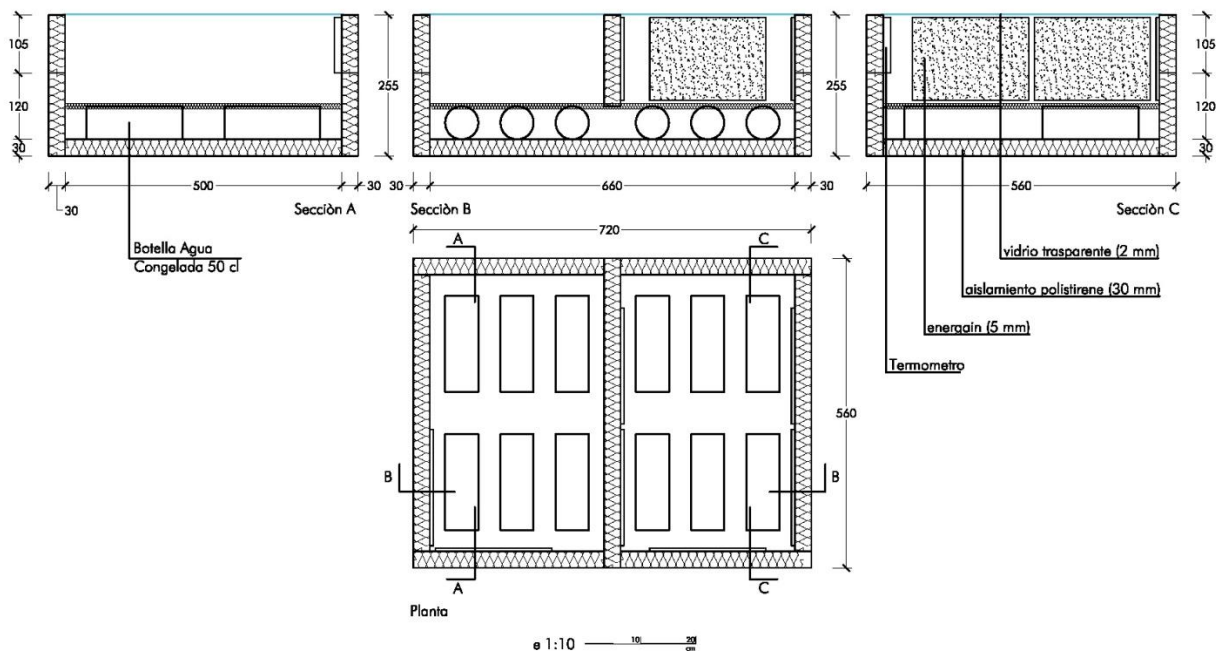
Para uniformar la temperatura interior se disponen en toda la base, reutilizando la anterior entonces con la misma dimensión, botellas de agua congelada, en total 9 litros de hielo. Solo un paño separa el hielo desde el resto de la caja. Para poder posicionar Energain en las paredes, he levantado todos los bordes de 10,5 cm. Esta vez, he utilizado todas las muestras de PCM disponibles, cinco, con una superficie total de 0.16 m<sup>2</sup>, 0,7 kg de peso y cerca 15 Wh de almacenamiento térmico.

Para los aportes externos, se ha pasado desde una fase 'noche' o sea con la caja dentro de la habitación, a una fase 'día', llevando el todo en el exterior, bajo de la radiación directa del sol. Los únicos elementos de sobra serán las paredes mismas de la caja, entonces en igual manera para las dos partes.

Los dos termómetros interiores esta vez son digitales, con la misma calidad estándar. Serán puestos pegados en la pared opuesta a los de Energain. El termómetro para medir la temperatura del aire, es lo de mercurio: en la primera fase está posicionado en la misma habitación, mientras luego se posicionará al exterior en una parte en sombra.

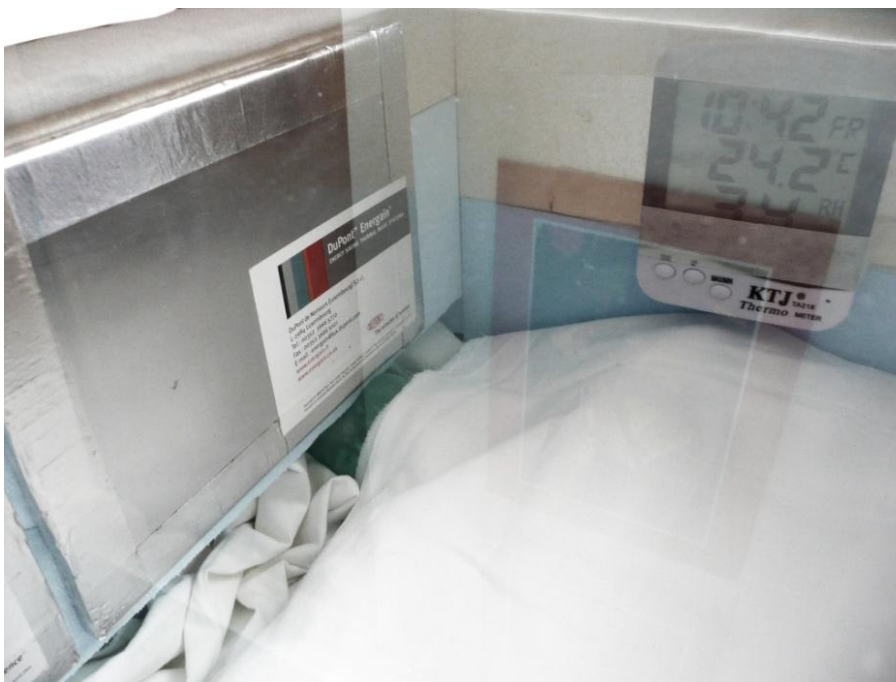
Para evitar que haya muchas pérdidas, además de los tejidos en los bordes, se posiciona una dobla manta abajo de la caja y otra alrededor de las paredes. No se usa la manta para cubrir el vidrio en la fase de enfriamiento porqué la temperatura sola gracias al hielo.

En el dibujo siguiente se explica todo el contenedor objeto de la demostración.



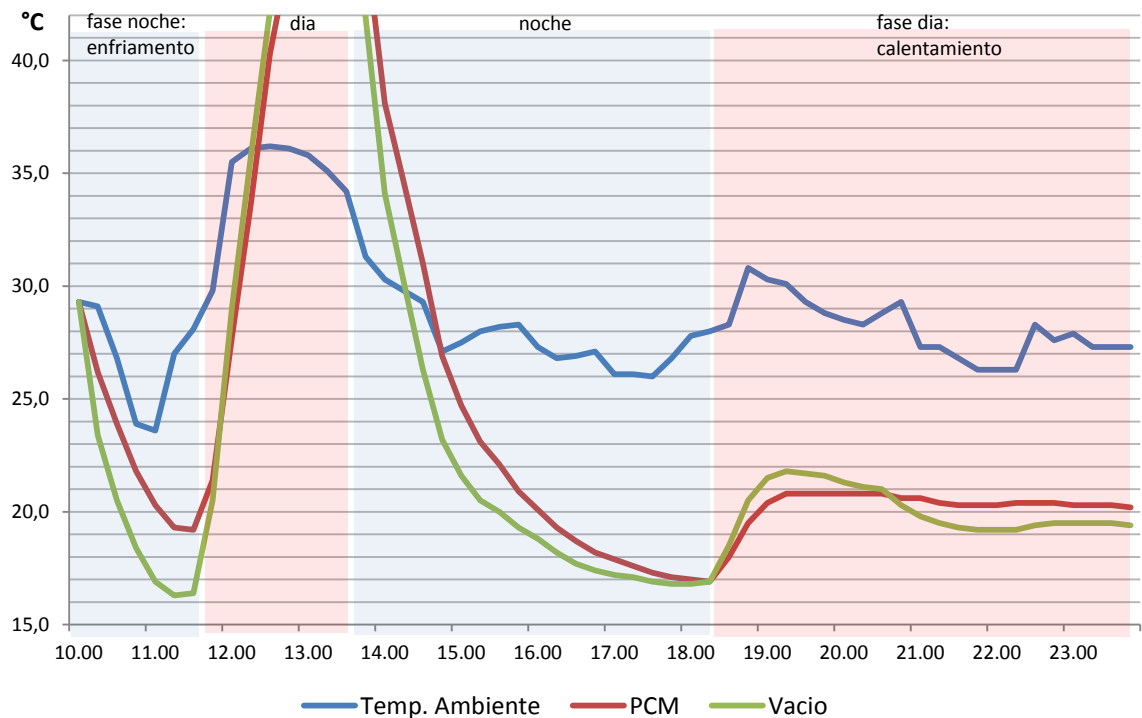
La demostración ha sido realizada en una habitación privada y su terrazo en Roma, el 25 Agosto del 2011, entre las 10:00 y la 23:30 horas, tomando nota de las tres temperaturas cada 15 min. La temperatura externa ha variado entre los 28 y los 37 °C, mientras la interna entre 24 y 30 °C.

E la página siguiente hay las fotos de la caja en el interior con la base de botellas congeladas, otra completa en el exterior y en la página siguiente un detalle de la esquina con el termómetro, el Energain y la base con el paño y las botellas.





En el gráfico siguiente, corregido para nivelar las diferencias entre los termómetros, se enseñan los andamios de las tres temperaturas. La temperatura del aire en las dos fases internas, ha sido manipulada por aportes de aire acondicionado, por esto varía entre los 24 y los 29 °C.



La temperatura de la caja ha bajado rápidamente por el absorbitamiento de calor por parte de las botellas de agua congelada, creando la fase 'noche', que partiendo desde 29 °C presentes en la habitación, llega en poco más de una hora rozando los 16 °C en el caso de la parte Vacía y 19 °C en la con PCM, marcando ya una primera diferencia. Después de las mediciones de las 12:00, constatando que difícilmente habría alcanzado una temperatura más baja, que la temperatura había superado la de fusión del PCM y se había estabilizado, llevo la caja fuera para empezar la fase 'día'. La temperatura sube rápidamente y se nota que la parte con PCM es más estable y atenúa ligeramente la subida de temperatura respecto a la otra. Constatando de haber alcanzado temperaturas demasiado altas para esta demostración, sobre las 13 horas paro la fase día y vuelvo a la de noche: mudo la caja otra vez en el interior y para ayudar la fase de enfriamiento, ya que las botellas se encuentran semi-descongeladas, pongo una manta sobre el vidrio para mejorar el aislamiento. Otra vez la temperatura baja, alcanzando una temperatura cercana a la de la primera fase de noche y la parte con PCM mantiene una cierta distancia respecto a la otra, quizá debido a sus propiedades pero también a un mayor calor alcanzado en la fase de calentamiento. Sobre las 18:30, cuando las dos temperaturas se habían estabilizado y acercado, vuelvo a sacar fuera toda la caja, quitando las mantas. La temperatura sube, pero con pocos aportes solares se queda alrededor de los 21 °C. También en esta última fase, el PCM marca la diferencia: mientras la otra es inestable, subiendo en presencia del sol y bajando después del atardecer, la otra se queda estable.

La demostración está satisfecha en parte: el material ha conseguido en estabilizar en las diferentes fases la temperatura respecto a la otra parte sin nada. Esto pero no ha sido en manera muy evidente. Posible mejoras de la demostración pueden ser hechas cerrando bien las dos partes, utilizando herramientas profesionales (se para el límites de 50°C que para su calibración) y evitando de posicionar el PCM bajo la radiación directa.

## 7. Conclusiones

Los climas con fuertes variaciones de temperaturas (ciclo día-noche e invierno-verano), siempre han adoptado soluciones constructivas con materiales masivos, para aprovechar una elevada inercia térmica y atenuar los cambios de temperatura. Eso porque en invierno se necesita almacenar calor, sea de manera activa como pasiva, para mantener la casa caliente por la noche y al revés en verano. El estilo de arquitectura contemporánea, ha entregado al diseñador del proyecto la posibilidad de hacer un edificio sin lugar, que permite adaptarse a los diferentes climas solo con el uso de aportes energéticos artificiales. Temas de confort climático, como la inercia térmica, han pasado a segundo plano respecto a un diseño sin compromisos, que dura el tiempo de una moda temporal. Ahora la innovación quiere solucionar esos problemas con nuevas tecnologías que por muy pocos aportes que necesiten, difícilmente podrán ser menos impactantes sobre el medio ambiente que las arquitecturas vernáculas.

El uso de sistemas con PCM es destinado a los edificios en climas variable, o sea, donde se necesita inercia térmica para atenuar las variaciones de temperatura. En climas tropicales, caracterizados por una fuerte humedad y temperaturas estables, no tendrían ningún sentido adoptarlos.

Para que el sistema funcione, también se necesita que el material cambie de fase, o sea una variación térmica de unos grados alrededor de su punto de fusión. Por esto, la elección del tipo de PCM debe tener en cuenta también los factores climáticos del lugar, para que ese funcione alrededor del rango deseado.

Las mismas consideraciones hay que tenerlas en cuentas si queremos emplear el PCM, sea en la temporada invernal que en la veraniega. Hay siempre que averiguar si las temperaturas del lugar permite el derretimiento del material para aprovechar el gran almacenamiento de calor latente.

Entonces podemos distinguir dos tipos diferentes, uno que funcione como sustituto de materiales macizos, como elemento de elevada inercia térmica, y otro como captador, como sistema indirecto que almacena el calor recibido por radiación solar de día, para devolverla durante la noche.

Cualquier sistema de muro solar (invernadero, Trombe o sus diferentes tipos), aunque de rendimiento elevado, será a coste de un peso mucho mayor que el sistema con cambio de fase. Eso es la ventaja de los PCM, poder usar sistemas captadores indirectos que normalmente solo son accesibles en poca altura, 1 o 2 pisos, porque si no el muro masivo requiere mucha estructura portante para desarrollarse en altura.

Hay siempre que tener en cuenta que esos tipos de sistema pasivos, además de ser limitados por ser ubicados en la fachada sur y sin obstrucciones, tienen una buena eficiencia para las habitaciones que están en directo contacto con esa pared, o en cualquier caso que la proporción entre volumen habitable y fachada no sea elevada. Su uso más practico sería en edificios de viviendas mientras que en grandes edificios, como estaciones o centros comerciales, sería bastante limitado.

Para esos casos sería más idóneo optar por el otro tipo, para que con poco peso puedan aumentar la inercia térmica, aplicable además en fachadas, también en tabiques y falsos techos, sin tener un impacto estético.

El peso es un factor importante para el uso de esos sistemas de almacenamiento térmico, que podrían emplearse no solo en los inmuebles, sino también en casas temporales, campos para refugiados, bungaló para campings, caravanas, y, quizá, viviendas lunares, siguiendo las huellas del vehículo Rover de la misión Apollo 15 que ya en los años 60 utilizaba parafina como almacenamiento térmico.

El coste es aún una desventaja para esos sistemas, pero normalmente se atenúa cuando su uso se difunde y la comercialización se amplía.

Sobre todo hay que reconocer que el PCM, cuando viene utilizado como sistema translucido, adquiere muchas propiedades que hasta ahora no se encontraban en otros elementos constructivos. Eso tiene la capacidad de ampliar las herramientas del arquitecto, ofreciendo otra visión de las paredes exteriores, hasta poder cambiar nuestra manera de proyectar. No solo desde el punto de vista del diseño y de la estética, sino también del confort y de la sostenibilidad hacia el medio.

Resumiendo, en esta tabla comparativa entre características de algunos materiales analizados en este informe, para valorar rápidamente ventajas y desventajas, seguro que el GlassX tiene unas cuantas calidades que le ofrecen una plaza privilegiada dentro de los elementos constructivos.

	transparencia	inercia termica	aisl termico	aisl acustico	precio	peso	imp. amb.	durabilidad	
GlassX									alto
muro solar									bajo
m. de agua									medio
LiTraCon									
vidrio doble									

Además de enseñar, que este nuevo elemento ofrece buenas características arquitectónicas, también se nota que no existe uno que cumpla todos los requisitos. Eso tiene que ser claro en cuando se elige es material, valorándolo por sus lados buenos y eventualmente descartándolo si los otros lados (coste, impacto ambiental, temperatura de fusión fuera de nuestro rango, control de la iluminación, etc.) no ofrecen lo que el confort arquitectónico nos requiere.

Aunque siendo partidario de una arquitectura que tiene raíz en su lugar, estructurando con él una relación de forma y materiales, me decanto por las aplicaciones arquitectónicas de los PCM. La investigación en este campo está en su apogeo, y cada vez más los PCM serán integrados en la arquitectura, respondiendo a las nuevas necesidades sociales y ambientales de los edificios.

## 8. Bibliografía

1. Benedetti C., Bacigalupi V., Materiali e progetto, Edizioni Kappa, 1996, Roma
2. Moncada Lo Giudice G., De Santoli L., Progettazione di Impianti Tecnici, Problemi e applicazioni, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 1995
3. Parareda Guillermo Y., Energía solar, edificación y clima, elementos para una arquitectura solar, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid, 1982
4. Serra Florensa R., Coch Roura H., Arquitectura y energía natural, Edicions UPC, 1995
5. Abhat A., Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, Solar Energy 1983, 30, pag 313-32
6. Castellón C., L. F. Cabeza, M. Medrano, M. Nogués, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, Energy and Buildings 39,2007, 113-119
7. Castellón C., L. F. Cabeza, M. Medrano, A. Castell, I. Martorell, Experimental Study of PCM Inclusion in Different Building Envelopes, ASME 131, 2009
8. Castellón C., L. F. Cabeza, M. Medrano, M. Nogués, J. Roca, Microencapsulated phase change materials (pcm) for building applications, Departament d'Informàtica i Eng. Industrial, Universitat de Lleida
9. Domínguez M., C. García, J. Mª Arias, Los materiales de cambio de fase (PCM) en la construcción, CSIC
10. Domínguez M., C. García, J. M Pinillos, P. Gutiérrez, Sistema pasivo de climatización. Patente de invención. Nº 9900558. España, 18 mar (1999)
11. Farid M. M., A. M. Khudhair, S.Ali K. Razack, S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management 45,2004, pag 1597-1615;
12. H. SM. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part 1: Heat storage materials and techniques. Energy Convers Mgmt 1998, 39, pag 1127-38
13. Ibáñez M., Lázaro A., et. al, An approach to the simulation of PCMs in building application using TRNSYS. Applied Thermal Engineering 25 (11-12): 1796-1807
14. Kaltenbach F., PCM - Acumuladores de calor latente para calefacción y refrigeración, Detail, Arquitectura solar, 4, 2005, pag. 482-486
15. Manz H., P. W. Egolf, P. Suter, A. Goetzberger, TIM-PCM External Wall System For Solar Space Heating And Daylighting, Solar Energy Vol. 61, No. 6, pp. 369-379, 1997
16. Mehling H., strategic project "Innovative PCM-Technology"- results and future perspectives. 8th expert meeting and workshop, Kizkalesi, Turkey, April 18-20, 2004



17. Oliver Ramirez Alicia, Integración de Materiale de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno, Aplicaciòn a sistemas de refrigeraciòn y calefacciòn pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios, Tesi doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, director Alfonso Garcia Santos, F. Javier Neila Gonzalez, 2009;
18. Tyagi V.V., D. Buddhi, A. Sharma, C.R. Chen, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 2009, pag 318-345
19. Tyagi V.V., D. Buddhi, Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2008
20. Zalba B, Marin J, Cabeza L, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Appl Therm Eng 2003; 23:251-83.
21. Zalewski L., S. Lassue, B. Duthoit, M. Chantant, Experimental thermal study of a solar wall of composite type, Energy and Buildings 25, 1997;
22. Zalewski L., S. Lassue, B. Duthoit, M. Butez, Study of solar walls - validating a simulation model, Building and Environment 37, 2002
23. Arman B., Calcestruzzo Trasparente, Milano, Editoriale Domus, 875, 2004
24. Dwellings for Senior Citizens in Domat, Ems, Detail, Documentation 6, 2007, pag. 633-637
25. Profile, Schüeco Architecture Magazine, n 8, pag 117-121
26. VV. AA., Planning and Building with Translucent Materials, Detail, Birkhauser, 2004
27. [www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org)
28. [www.litracon.hu](http://www.litracon.hu)
29. [www.italcementi.it](http://www.italcementi.it) > iLight
30. [www.climator.com](http://www.climator.com)
31. [www.micronal.de](http://www.micronal.de)
32. [www.energain.co.uk](http://www.energain.co.uk)
33. [www.glassx.ch](http://www.glassx.ch)
34. [www.miniwatt.it](http://www.miniwatt.it)
35. [www.doerken.de](http://www.doerken.de)
36. [www.itec.es/noubedec.e/bedec.aspx](http://www.itec.es/noubedec.e/bedec.aspx)
37. [www.schueco.com/web/2\\_grad\\_concept\\_en](http://www.schueco.com/web/2_grad_concept_en)